



Universidad Carlos III de Madrid

Diseño del sistema de suministro de combustible en ensayos aeronáuticos usados para la validación de agentes extintores sustitutivos del HALON 1301

Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Ignacio Pereira González

Tutor: Marco Antonio Álvarez Valenzuela

Madrid, Junio 2013

Diseño del sistema de suministro de combustible en ensayos aeronáuticos usados para la validación de agentes extintores sustitutivos del HALON 1301

Índice

1.	Introducción	7
1.1.	Objetivos	7
1.2.	Ámbito de aplicación.....	7
1.3.	Estado del arte	8
1.3.1.	Situación	8
1.3.2.	Agente extintor a sustituir: HALON 1301.....	10
1.3.3.	Combustible de trabajo: Jet A1.....	12
1.4.	Metodología utilizada	15
1.5.	Conclusiones previas	16
2.	Texto del trabajo	17
2.1.	Diseño del sistema de suministro de combustible.....	17
2.1.1.	Diseño 1	17
2.1.2.	Diseño 2	18
2.1.3.	Diseño 3	19
2.1.4.	Diseño 4	20
2.1.5.	Diseño 5	21
2.1.6.	Diseño 6	23
2.1.7.	Diseño 7	24
2.2.	Componentes del sistema de suministro de combustible	27
2.2.1.	Depósito principal	27
2.2.2.	Válvula de seguridad.....	30
2.2.3.	Válvula de control	32
2.2.4.	Depósito secundario o de calentamiento	34
2.2.5.	Tubería calefactable.....	40
2.2.6.	Válvula de descarga	42
2.2.7.	Bala de nitrógeno.....	44
2.2.8.	Bandeja de comprobación de llenado	46
2.2.9.	Válvula antirretorno	47
2.2.10.	Válvula de cierre	48
2.2.11.	Diseño definitivo	49
2.3.	Estudio hidráulico.....	50
2.3.1.	Primer caso de estudio	50
2.3.2.	Segundo caso de estudio	55
2.3.3.	Conclusiones cálculo hidráulico	59
2.4.	Instrumentación	59
2.4.1.	Tipos de sensores	59
2.4.2.	Localización y funciones de sensores.....	63
2.5.	Operatividad del sistema de suministro de combustible	73
2.5.1.	Operaciones de puesta a punto	75
2.5.2.	Operaciones de funcionamiento.....	76
3.	Conclusiones.....	77
4.	Trabajos futuros.....	79
5.	Referencias	81
	ANEXO I.....	83

Índice de imágenes

Imagen 1: Plano de planta de la piscina de combustible (cotas en mm) [1]	8
Imagen 2: Gondolas AIRBUS A380 [3]	9
Imagen 3: APU de A320 [4].....	10
Imagen 4: Diseño 1	17
Imagen 5: Diseño 2	18
Imagen 6: Diseño 3	19
Imagen 7: Diseño 4	20
Imagen 8: Diseño 5	21
Imagen 9: Diseño 6	23
Imagen 10: Diseño 7	24
Imagen 11: Diseño 7 como definitivo	26
Imagen 12: Depósito principal en el conjunto.....	27
Imagen 13: Depósito principal (cotas en m)	29
Imagen 14: Válvula de sobrepresión y alivio 1 [6]	29
Imagen 15: Válvula de sobrepresión y alivio 2 [6]	30
Imagen 16: Válvula de seguridad en el conjunto.....	30
Imagen 17: Válvula de seguridad entre depósitos [6]	31
Imagen 18: Válvula de control en el conjunto	32
Imagen 19: Esquema de la posición normal válvula de control	33
Imagen 20: Esquema de la posición 2 válvula de control	33
Imagen 21: Depósito secundario en el conjunto	34
Imagen 22: Depósito secundario (cotas en m)	36
Imagen 23: Pared depósito secundario	36
Imagen 24: Tubería calefactable en el conjunto	40
Imagen 25: Tubería calefactable [16]	41
Imagen 26: Válvula de descarga en el conjunto.....	42
Imagen 27: Esquema de la posición normal válvula de descarga	43
Imagen 28: Esquema de la posición 2 válvula de descarga	44
Imagen 29: Bala de nitrógeno en el conjunto.....	44
Imagen 30: Bandeja de comprobación en el conjunto	46
Imagen 31: Válvula antirretorno en el conjunto	47
Imagen 32: Válvula de cierre en el conjunto	48
Imagen 33: Esquema conjunto comprobación	49
Imagen 34: Diseño definitivo.....	49
Imagen 35: Esquema caso de estudio 1	51
Imagen 36: Esquema caso de estudio 2	56
Imagen 37: Localización Transductor de presión 1	63
Imagen 38: Localización sensor de nivel 1	64
Imagen 39: Localización Medidor de caudal 1.....	65
Imagen 40: Localización Transductor de presión 2	66
Imagen 41: Localización Sensores de temperatura T1-T8	67
Imagen 42: Localización Sensor de nivel 2	68
Imagen 43: Localización Medidor de caudal 2.....	69
Imagen 44: Localización Sensor de temperatura T10	70
Imagen 45: Localización Sensor de temperatura T9	71
Imagen 46: Localización instrumentación	73
Imagen 47: Esquema componentes e instrumentación	74

Índice de tablas

Tabla 1: Resumen estudios del diseño.....	25
Tabla 2: Instrumentación	72

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Bernouilli con pérdidas.....	51
Ecuación 2: Presión manométrica	54
Ecuación 3: Velocidad fluido interior a conducto	54
Ecuación 4: Número de Reynolds	54
Ecuación 5: Rugosidad relativa	54

Índice de diagramas

Diagrama 1: Metodología utilizada.....	15
Diagrama 2: Operaciones de puesta a punto.....	75
Diagrama 3: Operaciones de funcionamiento	76

1. Introducción

La realización de este proyecto surgió de la necesidad de eliminar el HALON 1301 como agente extintor en la industria aeronáutica, debido a su Potencial de Destrucción de la capa de Ozono (ODP). AIRBUS, como empresa líder en el sector aeronáutico, está en busca de un nuevo agente extintor que cumpla con los requisitos establecidos por la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA). Para ello, será necesario realizar ante EASA un ensayo en el que se verifique que el agente es realmente sustitutivo del HALON 1301. Por tanto, el propósito de AIRBUS es realizar un ensayo previo en el que se puedan realizar diferentes pruebas, para establecer los límites del agente extintor sustitutivo [1].

1.1. Objetivos

Los objetivos principales de este Trabajo se recogen en la siguiente lista:

1. Garantizar la ignición del combustible suministrado en la piscina del ensayo.
2. Asegurar la temperatura del combustible en la descarga, según requerimiento.
3. Asegurar el tiempo requerido en verter el combustible en la piscina.
4. Diseñar un sistema de suministro de combustible seguro.
5. Simplificar el diseño del sistema de suministro de combustible.

Es necesario destacar que este Trabajo está dirigido a ofrecer una solución al suministro de combustible para cumplir con los requerimientos de AIRBUS [1]. Por tanto, no se establecerán sistemas de extinción de incendios ni se evaluará la capacidad extintora del agente sustitutivo.

1.2. Ámbito de aplicación

El sistema de suministro de combustible que se diseñará debe ser implementado dentro del ensayo establecido por AIRBUS antes de presentar el agente sustitutivo a EASA, por lo que ciertos requerimientos deberán tenerse en cuenta para el diseño del sistema aquí descrito. Cabe indicar que algunos de estos requerimientos influyen de forma directa al planteamiento del sistema de suministro de combustible.

Las especificaciones relevantes del ensayo que condicionan el diseño del sistema son:

- El combustible a utilizar es JET A1.
- Se debe asegurar que la temperatura del combustible en la descarga a la piscina del ensayo debe de ser 68°C.

- En la imagen 1 se observa las dimensiones de la piscina que se debe usar en el ensayo:

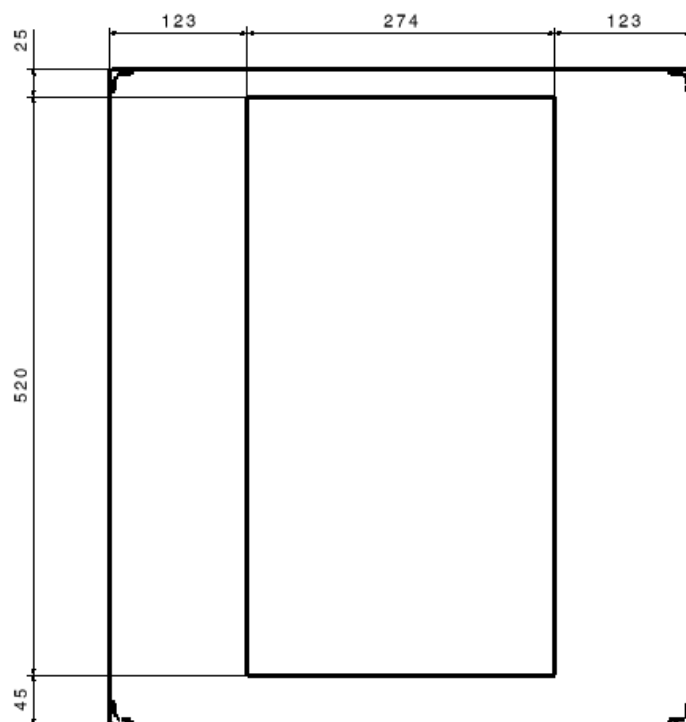


Imagen 1: Plano de planta de la piscina de combustible (cotas en mm) [1]

- El volumen de combustible descargado en la piscina debe ser $1,852 \pm 0,285$ litros.
- El combustible debe ser vertido en la piscina en 5 segundos como máximo.

1.3. Estado del arte

1.3.1. Situación

El ensayo requerido por AIRBUS consiste en provocar la ignición de un volumen determinado de combustible, alojado en una piscina. El combustible será Jet A1, que como se indica posteriormente es un tipo de combustible aeronáutico. La piscina estará situada dentro de un túnel de sección rectangular, dónde se reproducirán posibles condiciones ambientales que experimenta un avión, tanto en vuelo como en tierra.

Para la realización de este ensayo, AIRBUS ha especificado las condiciones del incendio que desea que se origine en el interior del túnel [1], ya que el agente extintor sustitutivo debe ser validado en un fuego en una góndola de motor o en una Unidad Auxiliar de Potencia (APU). Esto se debe a que la Administración Federal de Aviación (FAA) establece unas Normas Mínimas de Funcionamiento (MPS) para cada tipo de fuego en el avión, designando un apartado a fuegos localizados en dichas zonas del avión. Las MPS para los agentes que se utilizan en estos compartimentos son particularmente exigentes, debido a la presencia de

combustible y otros fluidos volátiles muy próximos a superficies a alta temperatura. Además, cabe destacar la existencia de flujos de aire comprimido, temperaturas y presiones extremadamente bajas por los que se ven afectadas las góndolas [2].

Una góndola de motor de un avión es el conjunto estructural que mantiene el motor unido al avión. Compuesta por “Entrada”, “Fan Cowl” y “Salida”, se mantiene unida al ala del avión por “Pylon” y aloja al motor en su interior, tal y como se muestra en la imagen 2. Por otro lado, una APU es un pequeño generador eléctrico, cuya función es la de proveer al avión de energía eléctrica cuando éste no puede obtenerla de los propios motores del avión.

Los fuegos originados en las góndolas de motor o en instalaciones de APU son de la Case B, ya que se originan en combustibles o líquidos inflamables. Las siguientes imágenes muestran las partes del avión aquí indicadas, para mayor entendimiento.



Imagen 2: Góndolas AIRBUS A380 [3]



Imagen 3: APU de A320 [4]

Actualmente, el HALON 1301 es el agente extintor más empleado para extinguir incendios en las partes de avión antes indicadas. Para la validación del HALON 1301 como agente extintor fue necesario cumplir con los requerimientos establecidos en la Circular Informativa 20-100 [5] (AC 20-100) publicada por FAA.

Puesto que no existe publicado una Especificación de Certificación (CS) por parte de EASA referente a la validación de agentes extintores sustitutivos del HALON 1301, no se ha podido encontrar ensayos o sistemas de suministro de combustible para utilizar como referencia en el diseño que se detallará.

1.3.2. Agente extintor a sustituir: HALON 1301

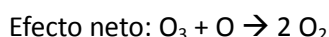
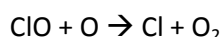
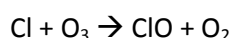
El HALON [6] es una agente extintor gaseoso que se puede utilizar en fuegos de equipos eléctricos, electrónicos, líquidos, gases y fuegos superficiales en sólidos. Las principales ventajas del HALON son su rapidez de extinción, la protección tridimensional que presta, su limpieza de aplicación, la rigidez eléctrica con la que cuenta y su inocuidad para las personas, evitando así accidentes en caso de descargas fortuitas. En cambio, produce gases corrosivos en presencia de llama, es inútil en sólidos incandescentes y su eficacia queda condicionada a una completa estanqueidad del recinto donde se produce el incendio, tanto durante como

después de la descarga. Los más utilizados como agentes extintores son el HALON 1301 (BrCF_3) para instalaciones fijas y el HALON 1211 (BrCClF_2) para extintores portátiles, cuya composición se indica entre paréntesis.

El ozono es un gas natural que cubre la atmósfera de la tierra con una fina capa [7]. Esta capa es de gran importancia para la defensa de la vida, ya que actúa como filtro de los rayos solares. A partir de 1984 se detectó, principalmente sobre la Antártida, una importante reducción de la concentración de ozono, teniendo como consecuencia la pérdida de espesor de la capa de ozono. Posteriormente, se ha observado el aumento de la magnitud de su destrucción y una situación similar, aunque menos pronunciada, sobre el Ártico.

Las sustancias que definimos como SAOs (Sustancias que Agotan el Ozono) [7], responsables de la disminución de la capa de ozono, no producen directamente esta destrucción. En primer lugar, sufren una serie de reacciones como la fotólisis, formando moléculas intermedias como cloruro de hidrógeno (HCl) o nitrato de cloro (ClONO_2), que tampoco reaccionan con el ozono directamente, sino que se descomponen lentamente generando, entre otras cosas, una pequeña cantidad de átomos de cloro (Cl) y de moléculas de monóxido de cloro (ClO), que son las que catalizan la destrucción del ozono.

Existen gran cantidad de reacciones envueltas en los procesos de destrucción, pero este proceso se puede simplificar en las indicadas a continuación.



El átomo de cloro actúa como catalizador, es decir, no es consumido en la reacción, por lo que destruye miles de moléculas de ozono antes de desaparecer.

Los halones tienen una estructura semejante a la de los CFC [7], pero contienen átomos de bromo en vez de cloro, que también trabajan como catalizadores, pero son aún más destructivos que los de cloro (unas 10 o 100 veces más). Por este motivo, es importante que la emisión de moléculas a la atmósfera con este tipo de átomos actuando como catalizadores sea mínima.

Las radiaciones ultravioleta (con λ menor de 360 nm) llevan mucha energía e interfieren con los enlaces moleculares [7], provocando cambios de las moléculas. Especialmente las de longitud de onda menor de 300 nm pueden alterar moléculas muy importantes para la vida como el ADN y provocarían daños irreparables si no fuera porque son absorbidas por la parte alta de la atmósfera, especialmente por la capa de ozono.

El ozono (O_3), absorbe con gran eficacia las radiaciones comprendidas entre 200 y 330 nm de longitud de onda, por lo que una disminución en la capa de ozono tiene efectos muy perjudiciales sobre los seres humanos y los ecosistemas en general. En el caso de los seres humanos, la sobreexposición a estas radiaciones produce efectos perjudiciales en la salud. En cuanto a la vegetación, estas radiaciones disminuyen la eficiencia de la fotosíntesis en plantas, lo que afecta a su crecimiento y al número de hojas, semillas y frutos que producen. En ecosistemas acuáticos, las radiaciones UV-B afectan a los organismos existentes hasta unos 5 m de profundidad en aguas transparentes. Esta disminución del metabolismo fotosintético del fitoplancton, base de las cadenas alimentarias, afecta, en último término, a todo el ecosistema, provocando una disminución del rendimiento energético global.

En 1987 se firmó el Protocolo de Montreal [6], que prohibía la fabricación e importación de HALON desde 1994, además de la retirada y desactivación de los sistemas de extinción que utilizaran dicho agente extintor antes de 2004. Este protocolo permitía el uso de HALON en determinadas aplicaciones en las que no exista ningún sustituto que cumpla los requisitos de extinción, pero obliga a buscar un agente que llegue a sustituir al actual y que respete el Medio Ambiente.

Una de las aplicaciones en las que se ha permitido continuar usando HALON 1301 es en la industria aeronáutica. Aun así, AIRBUS ha decidido eliminarlo de sus sistemas de extinción de incendios, debido al gran deterioro medio ambiental que produce.

Uno de estos agentes extintores con los que se pretende sustituir al HALON 1301 es el NOVEC 1230[8]. Este agente es un líquido que no daña al medio ambiente, fabricado por 3M y que generalmente se usa en situaciones en las que el agua de extinción de incendios no se puede usar, como en equipos electrónicos, museos, bancos u hospitales. Además, se caracteriza por su baja toxicidad, su falta de corrosividad y conductividad y su rápida evaporación; factores que permiten descargarlo en zonas de ocupación normal u ocasional. Al evaporarse cincuenta veces más rápido que el agua, permite preservar recursos elevadamente valiosos como aparatos electrónicos, controles o equipos de navegación. Mientras que las espumas y polvos dejan residuos, el Novec 1230 no los deja y permite que los controles y equipos sigan en funcionamiento.

En cuanto al impacto del Novec 1230 en el medio ambiente, cabe destacar que posee un nivel de Potencial de Calentamiento Global de 1, tiene una vida atmosférica de 5 días y de Potencial de Reducción de Ozono de cero. Esto lo deja exento de pertenecer al grupo de agentes extintores eliminado en el Protocolo de Kioto.

1.3.3. Combustible de trabajo: Jet A1

El Jet A1 es un combustible aeronáutico [9], por lo que su energía calorífica puede ser transformada en energía mecánica en el motor de una aeronave, consiguiendo fuerza de empuje para posibilitar el vuelo. Debe existir una correcta relación entre el combustible y el motor, puesto que existen diversas condiciones de operación relativas a cada motor.

Existen tres tipos de combustibles de Jets comerciales, designados como Jet A, Jet A 1 y Jet B. Por un lado, el Jet A tiene un punto de inflamación de 38 ° C y un punto de congelación de -40°C. La evaporación y ebullición a altas temperaturas es leve, debido a la baja presión del vapor. Por otro lado, el Jet B es una mezcla de gasolina de aviación y keroseno y tiene un menor calor neto de combustión.

El Jet A1, combustible empleado en el ensayo por requerimiento de AIRBUS, es esencialmente una mezcla de fracciones de keroseno, producto de la destilación primaria del petróleo, con especiales características a bajas temperaturas. Del mismo modo que el Jet A, tiene un punto de inflamación de 38°C y un punto de congelación de -40°C a 1atm. También comparte la baja evaporación y ebullición a altas temperaturas.

A continuación se detallan algunas características que pueden considerarse útiles para el ensayo del Jet A1 y el diseño del sistema de suministro de combustible. [9]

- Estabilidad térmica: Este combustible de turbina tiene muy buena estabilidad térmica, ya que resiste temperaturas sobre los 200°C, lo que evita la formación de lacas y depósitos, que afectarían adversamente a sus componentes, aparatos de medidas, filtros y boquillas. El método de ensayo ASTM D-1660 permite evaluar la estabilidad térmica de los combustibles.
- Estabilidad física: En cuanto a su estabilidad física, cabe destacar que el comportamiento del keroseno y el tiempo que puede estar almacenado sin deteriorarse depende de la naturaleza y la cantidad de hidrocarburo presentes en él. Esto se debe a que este tipo de hidrocarburos difieren considerablemente en su tendencia a combinarse con otros elementos tales como el oxígeno del aire. Cuando los hidrocarburos se combinan con el oxígeno del aire, se forman compuestos llamados gomas. Para prevenir el desarrollo de estos compuestos en las turbinas se les agregan aditivos inhibidores, siendo en el tanque de almacenamiento de la aeronave el punto donde suele darse este fenómeno. En un motor muy inestable, las gomas pueden encontrarse en forma soluble e insoluble en el combustible. La forma insoluble crea serios problemas en el surtidor de la bomba y válvulas, así como en los filtros del combustible. La forma soluble puede causar problemas en el sistema de combustible, en puntos donde hay escapes microscópicos y delgadas películas de combustible.
- Punto de congelamiento: Debido a su alta viscosidad, un combustible convencional a temperaturas bajas puede tender a solidificarse y no fluir dentro de los tanques de almacenamiento a la cámara de combustión. Por el contrario, los combustibles de turbina, al adquirir un punto de ebullición por debajo de los 300°C, generalmente tienen viscosidades suficientemente bajas para una adecuada capacidad de bombeo bajo el punto de congelación, el cual puede alcanzar hasta -50°C.
- Volatilidad: es la capacidad de un componente para cambiar de su estado líquido a vapor por la aplicación de calor o por contacto de un gas que lo pueda evaporar. Para introducir el Jet Fuel en la cámara de combustión de las turbinas a gas se utilizan dos

métodos, uno en el cual el combustible se atomiza y el otro en el que el combustible se introduce a través de una cañería que lo vaporiza por el calor. Cabe destacar que la facilidad de encendido, la estabilidad de la llama y la eficiencia de la combustión dependen, principalmente, de la volatilidad del combustible y de la fuerza de su atomización.

A continuación se resumen las propiedades más importantes a destacar del jet A1 [9]:

- Combustión: efectivo poder de quemado y limpieza tras ésta.
- Contenido de calor: capacidad para proporcionar una adecuada energía de empuje.
- Estabilidad: capacidad para resistir la degradación química en el almacenaje o cuando se use como un medio de transferencia de calor.
- No corrosivo: Mínimo ataque químico a los componentes del sistema de combustión del avión.
- Capacidad de ser bombeado: facilidad para ser transferido bajo toda condición.
- Volatilidad: facilidad para evaporarse con el quemado, pero no lo suficiente bajo presión que produzca pérdidas excesivas en tanques.

1.4. Metodología utilizada

En el siguiente diagrama de bloques se refleja la metodología que se ha llevado a cabo para realización del diseño del sistema de suministro:

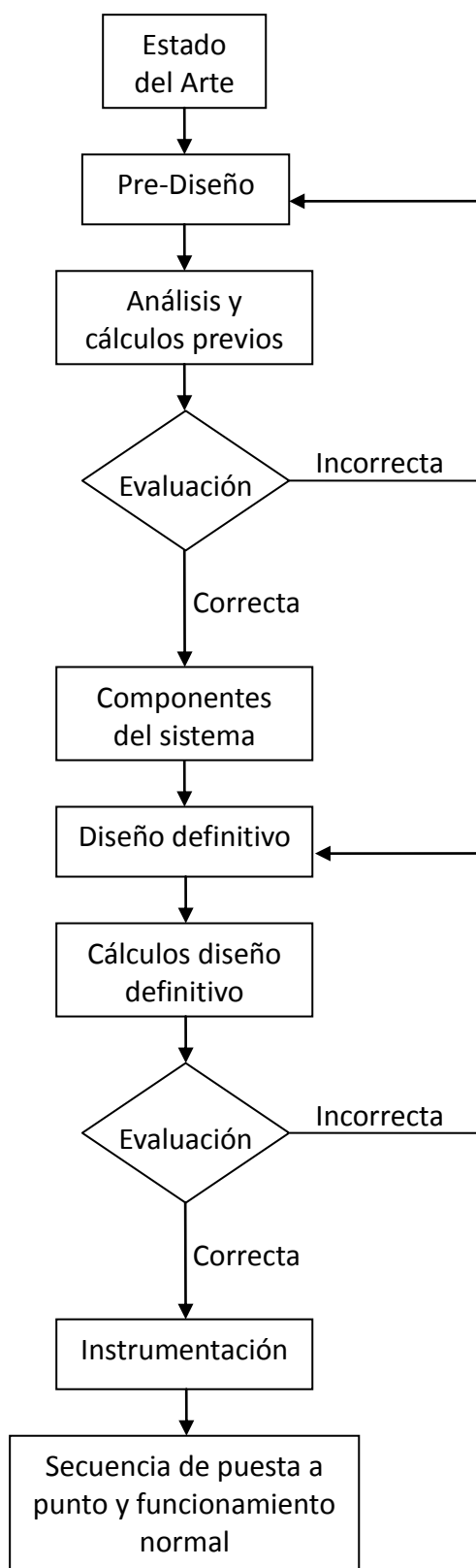


Diagrama 1: Metodología utilizada

1.5. Conclusiones previas

Durante la realización de esta introducción del Trabajo Fin de Grado aquí descrito, se han obtenido como conclusiones más relevantes las expuestas en la siguiente lista:

- Importancia de los riesgos derivados de la manipulación y almacenamiento de combustibles líquidos.
- Necesidad de un control muy preciso de las variables que gobiernan una instalación de éstas características.
- Conocimiento de la diversidad de componentes comerciales que se usan para confeccionar un sistema de suministro de combustible.

2. Texto del trabajo

2.1. Diseño del sistema de suministro de combustible

Para el diseño del sistema de suministro de combustible, en base a los requerimientos establecidos por AIRBUS [1], se ha diseñado una sucesión de estudios, estableciendo las ventajas e inconvenientes de cada una ellas. De tal forma que, en cada una de los diseños aquí descritos, se ha intentado eliminar los inconvenientes y mantener las ventajas del diseño anterior a éste. Además de cumplir con los requerimientos de AIRBUS, se ha tenido en cuenta la necesidad de almacenar, suministrar y calentar combustible Jet A1 de forma segura para el personal involucrado y optimizando el número de componentes por simplicidad.

2.1.1. Diseño 1

El primer diseño del sistema de suministro de combustible estudiado se centró en cumplir con el requerimiento de suministrar combustible Jet A1 precalentado a 68°C.

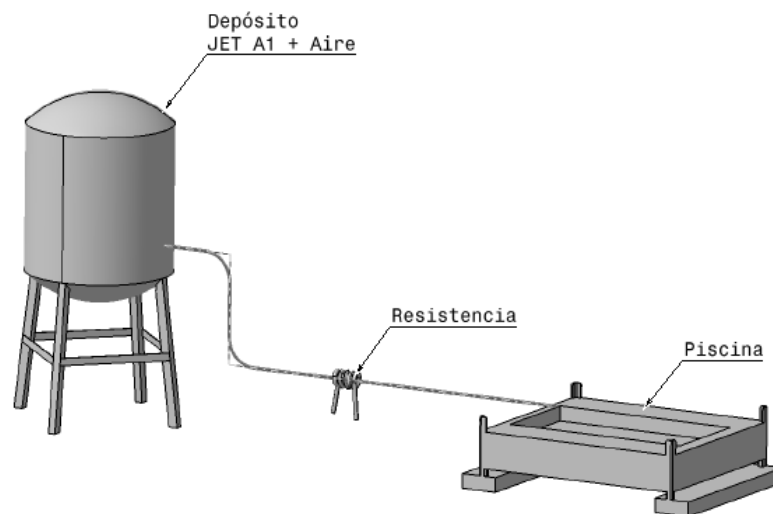


Imagen 4: Diseño 1

Características:

- ✓ El combustible estaría almacenado en un depósito cerrado en presencia de aire.
- ✓ El Jet A1 sería suministrado a la piscina a 68°C a través de un conducto que llevaría arrollado en un tramo una resistencia eléctrica que adquiriría temperatura por efecto Joule, lo que permitiría calentar el combustible.

Análisis:

- Se evitan puntos calientes y cargar eléctricamente al combustible, pudiendo originar una combustión espontánea, ya que la resistencia eléctrica no estaría en contacto directo con el combustible, sino que iría enrollada a la parte exterior del conducto debidamente aislado.
- El combustible estaría almacenado en un depósito con oxígeno, pudiéndose producir una explosión. Como se indica en la ficha de seguridad del Jet A1 [10], los vapores de éste forman una mezcla explosiva en contacto con el aire a partir de los 38°C, a presión atmosférica.

2.1.2. Diseño 2

En el segundo diseño de estudio se buscó resolver el problema que conlleva almacenar Jet A1 con oxígeno.

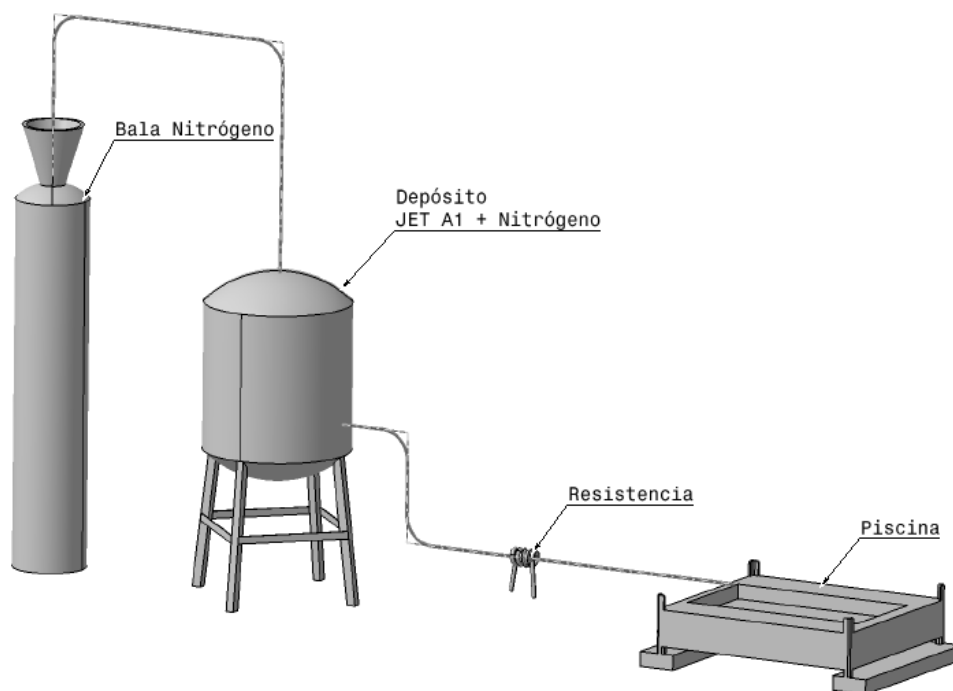


Imagen 5: Diseño 2

Características:

- ✓ Se sustituye el aire en contacto con el combustible dentro del depósito principal por nitrógeno.
- ✓ El combustible es calentado desde su temperatura inicial hasta la temperatura requerida de 68°C gracias a una resistencia arrollada a la tubería de descarga a la piscina.

Análisis:

- Se escoge como gas sustitutivo del aire en el interior del depósito el nitrógeno ya que se trata de un gas inerte, inocuo para las personas, de fácil manejo y sencillo de conseguir. Por tanto, se evita la auto ignición del combustible.
- La potencia térmica requerida por el combustible y generada por la resistencia eléctrica es excesiva para producir el salto térmico necesario.

2.1.3. Diseño 3

Se realizó entonces un nuevo diseño que disminuyese la potencia térmica necesaria a comunicar para el calentamiento del combustible hasta la temperatura requerida.

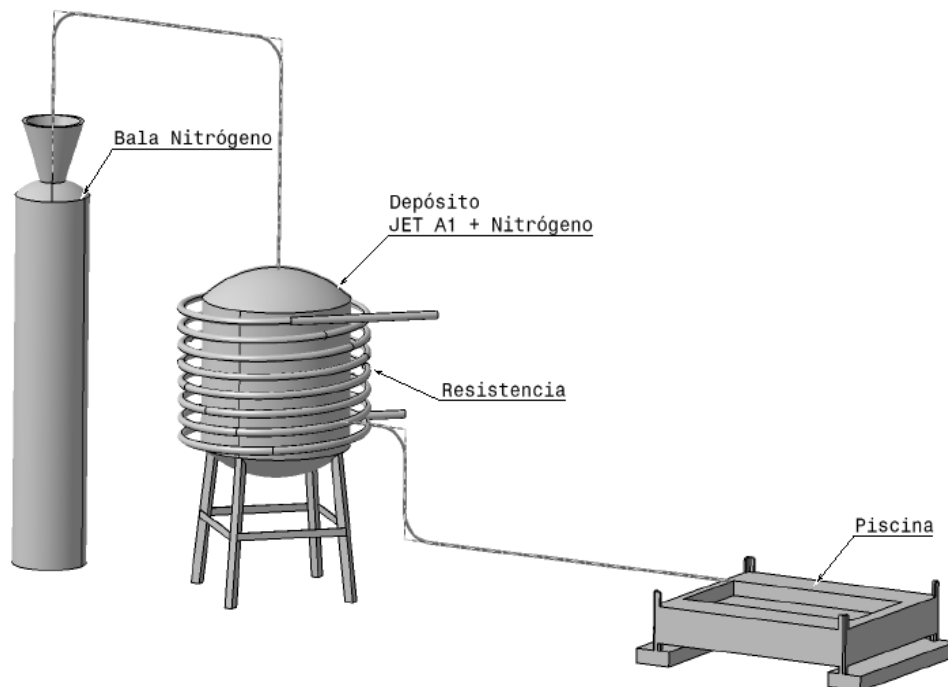


Imagen 6: Diseño 3

Características:

- ✓ Resistencia eléctrica arrollada al depósito de almacenamiento, en vez de al conducto de suministro a la piscina, pudiendo mantener el combustible almacenado en el depósito hasta que alcance los 68°C necesarios.

Análisis:

- El combustible se encuentra almacenado con nitrógeno y no con aire atmosférico, evitando la inflamación del Jet A1 al ser calentado, ya que se encuentra en condiciones adecuadas y ante una posible fuente de calor.
- Combustible a 68°C en el depósito, pero no se asegura esta temperatura en el punto de descarga a la piscina que es donde se requiere. Se puede considerar que estableciendo una relación entre la temperatura del Jet A1 en el depósito antes de su descarga y la temperatura exterior, se conseguiría evitar este problema. Sin embargo, esto restringiría mucho el uso del sistema de suministro de combustible debido a que el combustible debería ser vertido a una velocidad determinada.

2.1.4. Diseño 4

En este nuevo diseño se opta por incluir de nuevo la resistencia arrollada en el conducto de descarga, pero en este caso para evitar la pérdidas térmicas.

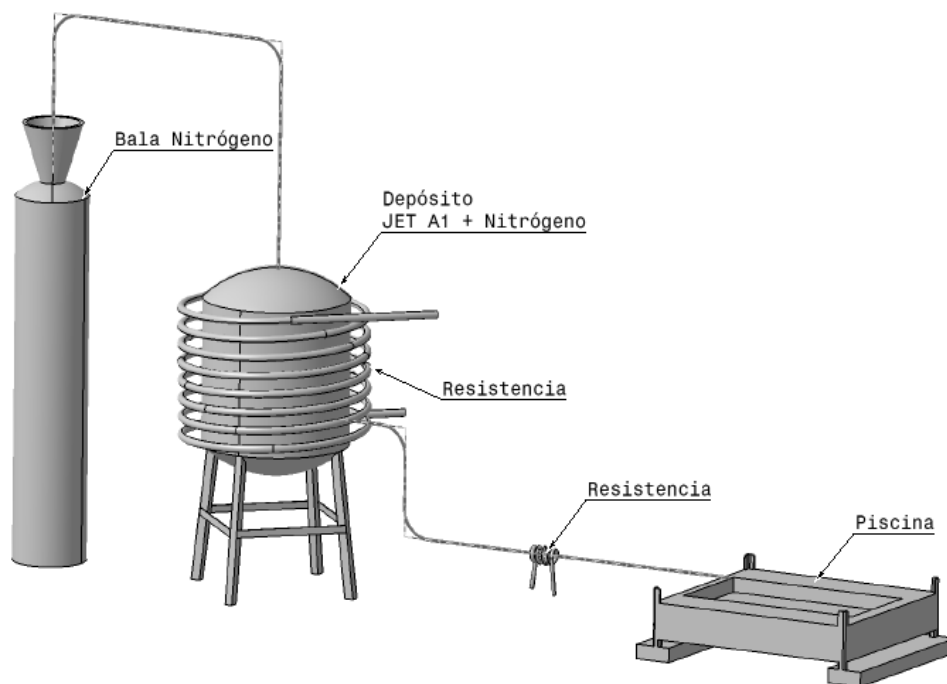


Imagen 7: Diseño 4

Características:

- ✓ Se asegura que el combustible estará a 68°C en el momento de ser descargado a la piscina, gracias a la resistencia arrollada exteriormente al conducto de descarga que evita las pérdidas con el exterior.

- ✓ Gracias a un sensor de temperatura en el extremo de descarga a la piscina se podrá asegurar que la temperatura del combustible antes de llenar la piscina cumple con el requerimiento de AIRBUS [1].

Análisis:

- El combustible es calentado sin poder controlar la presión que se alcanza en el depósito principal. Esto resulta peligroso ya que se conoce cómo se comporta el Jet A1 a altas temperaturas y a presión ambiente [10], auto inflamándose cuando alcanza 228°C a presión ambiente. En cambio, se desconoce la temperatura a la que se auto inflamaría cuando esa presión aumentase. Lo que sí se puede considerar es que al aumentar la presión, disminuirá la temperatura necesaria para producirse una auto ignición.

2.1.5. Diseño 5

En este nuevo diseño se añade una válvula de seguridad en la parte superior del depósito de combustible, evitando la auto ignición del Jet A1.

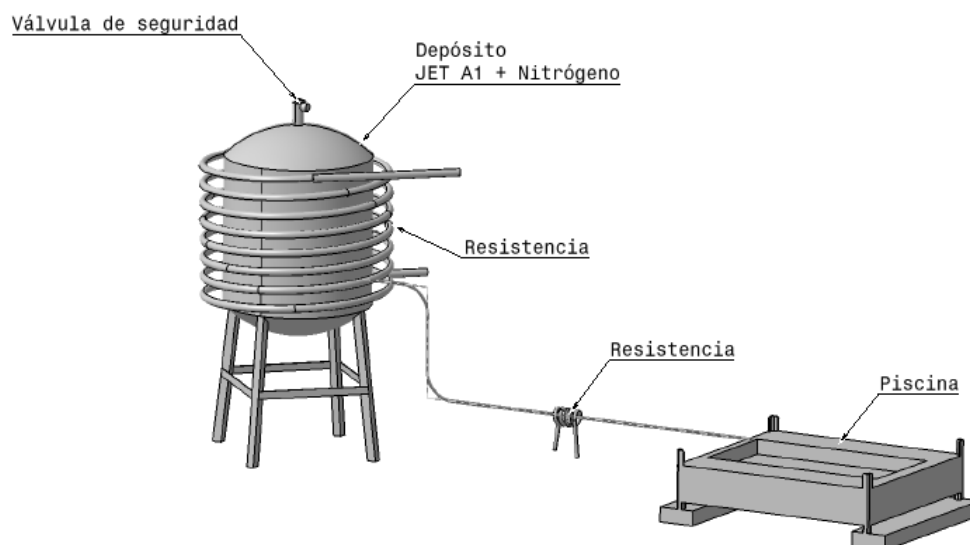


Imagen 8: Diseño 5

Características:

- ✓ Con la válvula en la parte superior del depósito, el Jet A1 se dilatará al ser calentado y, cuando se alcance en el interior del depósito una presión preestablecida, se abrirá la válvula de seguridad, liberando parte del nitrógeno.
- ✓ Se puede establecer la presión máxima admisible en el interior del depósito, y por tanto la presión máxima a la que se calentará el Jet A1 hasta los 68°C requeridos.
- ✓ Como se muestra en la imagen 8, la bala de nitrógeno no tiene que estar conectada continuamente al depósito, sino que se podrá suministrar el nitrógeno necesario y retirar la bala.

Análisis:

- Modo de calentamiento de combustible ineficiente ya que, al tener que llevar al nitrógeno a los 68°C que debe alcanzar Jet A1, el nitrógeno roba parte del calor suministrado al combustible.
- No se tiene un depósito donde poder almacenar combustible, sino que se tendría un depósito calentando un volumen alto de Jet A1, lo cual resultaría muy costoso por requerir mucha energía por parte de la resistencia eléctrica, o se necesitaría tener personal que llene el sistema de combustible constantemente.

2.1.6. Diseño 6

En el siguiente diseño del sistema se optó por añadir un depósito de almacenamiento previo al depósito de calentamiento.

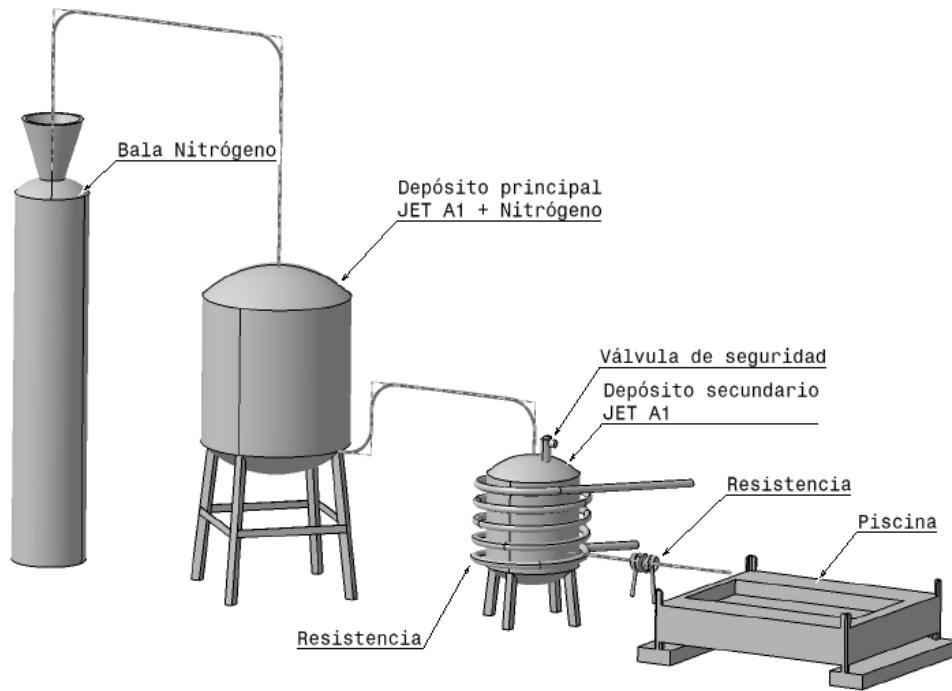


Imagen 9: Diseño 6

Características:

- ✓ Se pueden realizar varios ensayos sin requerir que haya personal que suministre combustible al sistema de suministro de combustible.
- ✓ Para transportar el combustible del depósito principal al secundario, se presuriza toda la línea de suministro de combustible gracias a la bala de nitrógeno. Esta presurización será algo superior a la atmosférica.
- ✓ Se mantiene la válvula de seguridad en el depósito de calentamiento que asegurará que no aumente la presión del combustible al ser calentado y pueda producirse una explosión.
- ✓ Entre ambos depósitos se incorporará una válvula de tres vías y dos posiciones para cerrar el conducto que une ambos depósitos una vez que el depósito de calentamiento se ha llenado, evitando que el combustible calentado pase al depósito principal, al aumentar de volumen.

Análisis:

- Al añadir un depósito de almacenamiento se calienta únicamente combustible y se aprovecha al máximo la potencia térmica cedida por la resistencia arrollada en el depósito.
- En caso de producirse un aumento de presión superior al deseado en el depósito secundario, la válvula de seguridad liberará Jet A1 en forma de vapor.
- En la salida de la válvula de seguridad habrá una mezcla inflamable formada por Jet A1 en estado vapor y aire del exterior.

2.1.7. Diseño 7

Con este nuevo diseño se cumplen todos los requisitos de seguridad establecidos y con todos los requerimientos relacionados con la especificación del ensayo de AIRBUS [1].

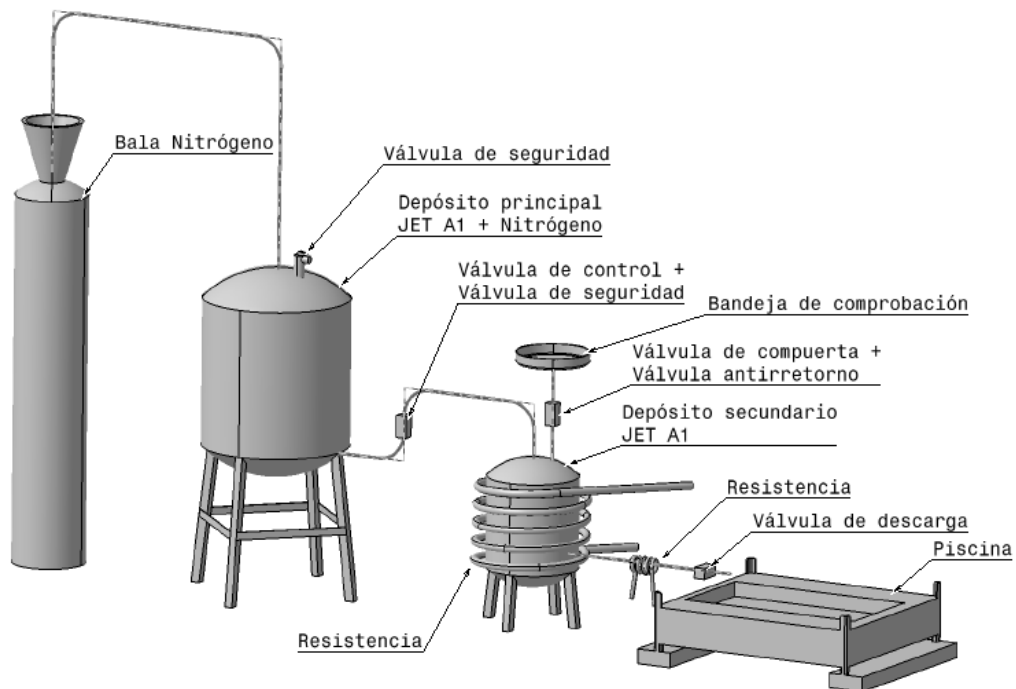


Imagen 10: Diseño 7

Características:

- ✓ Conjunto válvulas para absorber el incremento de presión que experimentará el combustible durante el calentamiento en el depósito secundario. Conjunto formado por una válvula de control de tres vías y dos posiciones y una válvula de seguridad.
- ✓ Se incluye una válvula de seguridad en la parte superior del depósito principal que evacuará nitrógeno en caso de aumento de presión.

- ✓ Se ha incluido en la descarga del sistema de suministro de combustible una válvula de control de una vía y dos posiciones que posibilitará abrir o cerrar el conducto de descarga cuando el personal de control lo desee.
- ✓ Por motivos de llenado del sistema de suministro de combustible, se ha acoplado a la parte superior del depósito secundario una tubería con una válvula antirretorno, una válvula de compuerta y una bandeja de comprobación.

Análisis:

- Se presurizará la línea de suministro a la presión deseada para asegurar su correcto funcionamiento.
- Los aumentos de presión por el calentamiento del combustible serán absorbidos por la válvula de seguridad entre depósitos y, si es necesario, por la válvula de seguridad del depósito principal de este diseño.

A continuación se recoge en la tabla 1 las ventajas e inconvenientes de cada diseño analizado.

DISEÑO	INCONVENIENTES	VENTAJAS
1	Posible inflamación del combustible debido a la existencia de Jet A1 + Oxígeno	El combustible es suministrado según los requerimientos del ensayo
2	Calentamiento poco eficiente debido al exceso de potencia térmica requerida	No hay posibilidad de inflamación del combustible al sustituir el Oxígeno por Nitrógeno
3	Pérdidas térmicas en el conducto de descarga a la piscina	Calentamiento más eficiente ya que se requiere menos potencia térmica
4	Posibilidad de autoinflamabilidad del Jet A1	No hay pérdidas térmicas en el conducto de descarga a la piscina
5	Calentamiento poco eficiente al calentar el combustible y el Nitrógeno	No hay posibilidad de autoinflamabilidad del Jet A1
6	Posibilidad de producir un incendio al liberar Jet A1 calentado en forma de vapor	Calentamiento más eficiente ya que se calienta únicamente el combustible
7	No hay posibilidad de realizar la automatización del sistema de suministro de combustible	No se libera Jet A1 calentado en forma vapor porque es el depósito principal el que absorbe los incrementos de presión del depósito secundario

Tabla 1: Resumen estudios del diseño

Gracias al estudio y análisis de los diseños anteriormente detallados se han determinado las necesidades del diseño definitivo. El mayor inconveniente encontrado ha sido trabajar con un combustible que debe ser calentado. Por tanto, se ha tenido como primer objetivo el diseñar un sistema de suministro de combustible seguro para el personal de control de la instalación, además de obtener la mayor eficiencia en cada uno de los procesos.

En la siguiente imagen se indica el diseño definitivo con cada uno de sus componentes.

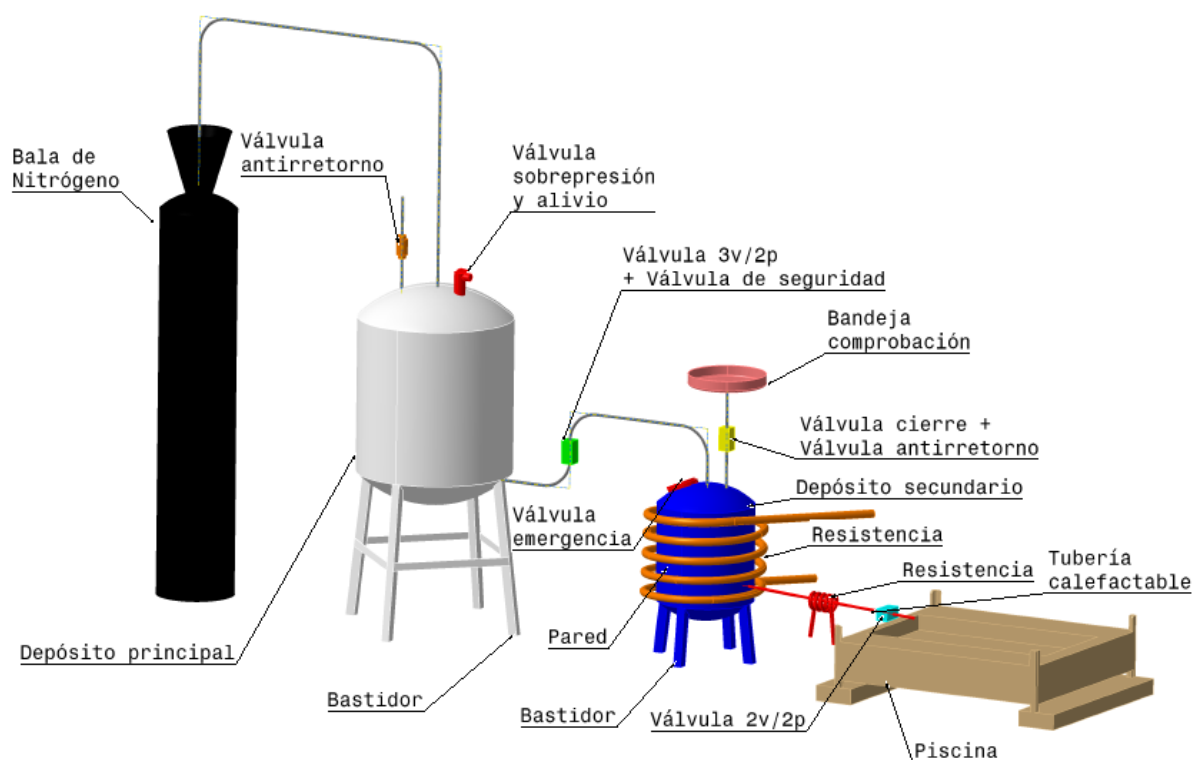


Imagen 11: Diseño 7 como definitivo

2.2. Componentes del sistema de suministro de combustible

A continuación se detallan los componentes que forman la instalación y sus características.

2.2.1. Depósito principal

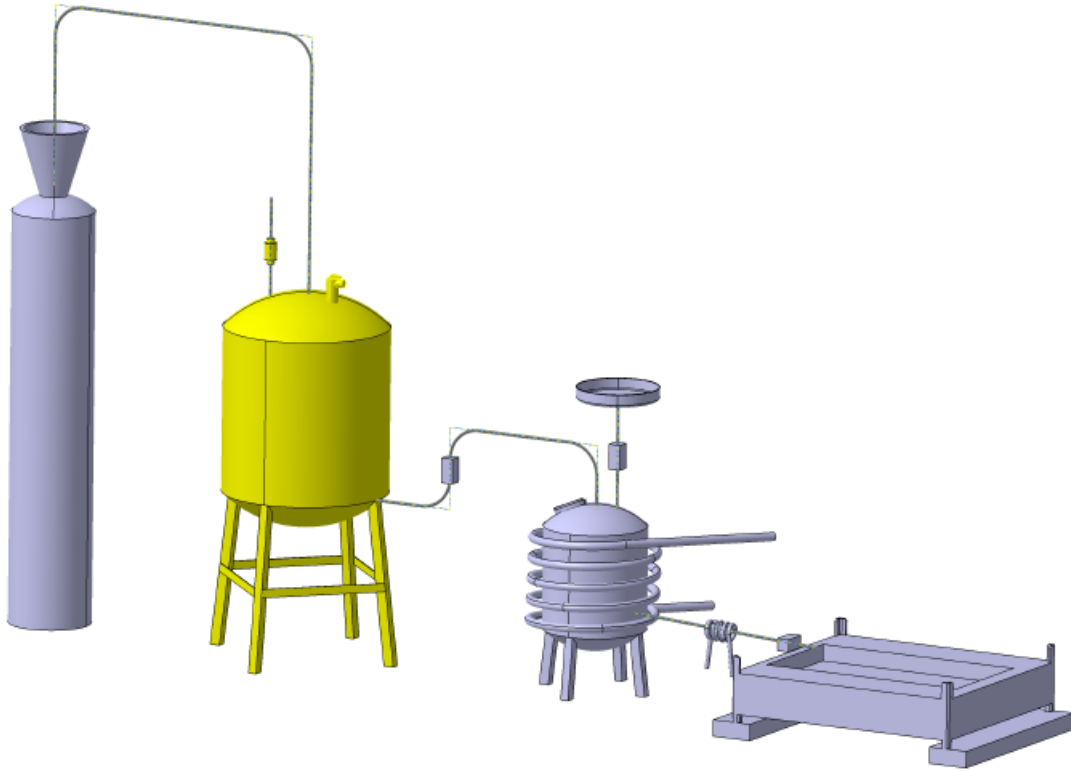


Imagen 12: Depósito principal en el conjunto

Se podría optar por solicitar dicho componente a la empresa Bachiller [11], ya que son especialistas en fabricar depósitos según los requisitos establecidos por el cliente. Para este caso se solicitaría un depósito de combustible que cumpla con las características descritas a continuación.

Se trata de un depósito de almacenamiento de un volumen de 100L de capacidad, cilíndrico y montado sobre un bastidor que lo eleva del suelo. Las dimensiones del depósito son: 1m de altura por 1,13m de diámetro. El material del depósito es acero inoxidable AISI 304, ya que es muy utilizado en la industria para almacenar combustible.

Se requiere una toma en el depósito para introducir el combustible a almacenar. Para facilitar la operación de llenado, esta entrada de combustible deberá de estar en la parte superior del depósito. Deberá de incluir una válvula antirretorno que permita introducir combustible pero evite la salida de éste o del nitrógeno con el que se presurizará la instalación. En caso que la empresa suministradora del depósito principal no pueda incluir

dicha válvula, Spirax Sarco [12] es una empresa suministradora de válvulas de este tipo para combustibles.

También es necesario una toma para conectar la bala de nitrógeno, posteriormente descrita, al depósito principal de combustible. Al igual que la toma de entrada de combustible, ésta deberá de situarse en la parte superior del depósito para asegurar la eliminación de aire en la instalación a la hora de realizar la puesta a punto, descrita en el punto 2.6.

Para asegurar la integridad del depósito se requiere una válvula de sobre-presión y de alivio de vacío. Esta válvula permite liberar nitrógeno en caso de que la presión del depósito sea superior a 1,3bar o introduce aire del exterior en caso de emergencia porque haya una depresión.

Se requiere una salida de combustible que se conectará al depósito secundario. Esta salida deberá de estar situada en la parte inferior del depósito para poder suministrar al depósito secundario la mayor parte de combustible almacenado.

Por motivos de seguridad y operatividad se debe de introducir un dispositivo para medir el nivel de combustible. Por ello se deberá de incluir una apertura para acoplar el sensor de nivel, posteriormente descrito, al depósito de combustible.

A pesar de incluir una válvula de sobre-presión, es recomendable acoplar un transductor de presión estática que indique la presión que hay en el interior de depósito en todo momento. Este transductor conlleva también su correspondiente orificio en el depósito principal. Para medir la presión del depósito en el punto donde se añadirá la válvula de sobre-presión, la apertura se realizará en la parte superior del depósito.

A continuación se añade una imagen en la que se esquematiza el depósito principal con sus respectivos elementos.

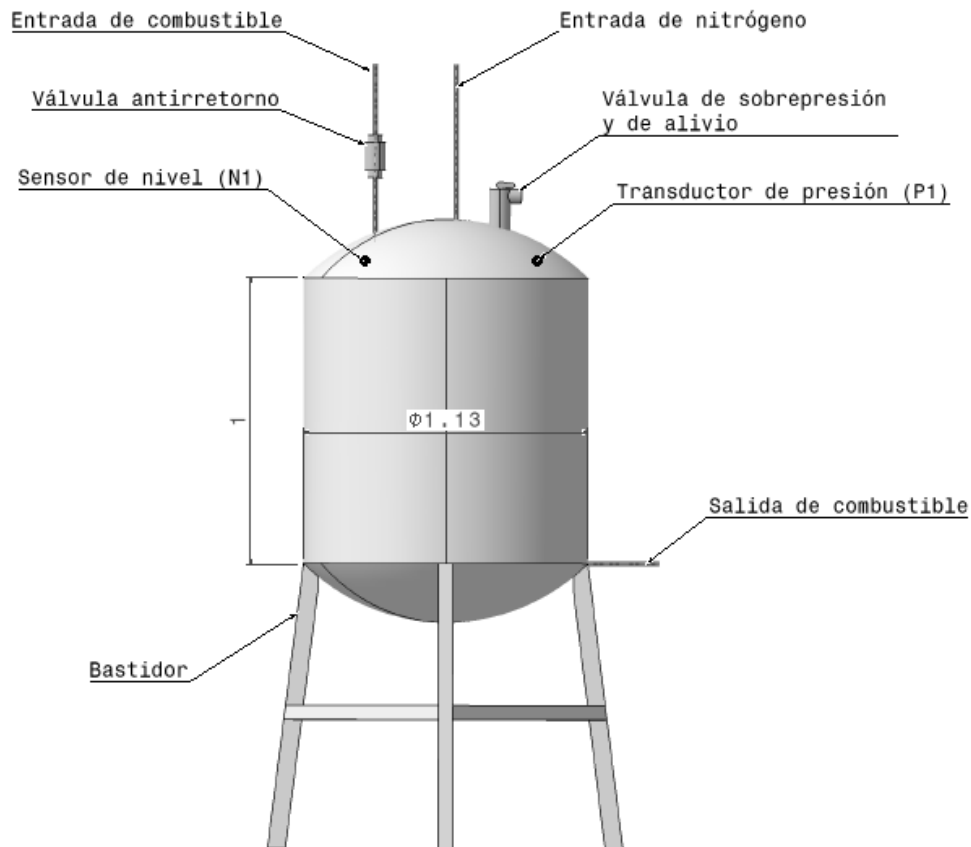


Imagen 13: Depósito principal (cotas en m)

- Válvula de sobre-presión y alivio de vacío

Esta válvula permite asegurar la integridad del depósito principal y de la instalación en conjunto. Por un lado, en caso de que se produzca un aumento de presión superior al determinado como límite superior, la válvula liberará nitrógeno (ya que se encuentra en la parte superior del depósito principal) consiguiendo disminuir la presión hasta el límite superior establecido en 1,3bar. En la siguiente imagen se muestra la posición de la válvula en caso de darse esta circunstancia.

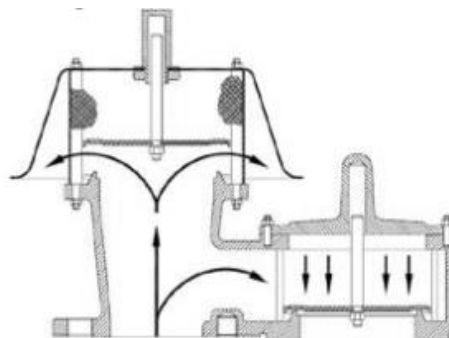


Imagen 14: Válvula de sobrepresión y alivio 1 [6]

Por otro lado, en caso de que se produzca una depresión en el depósito principal por algún fallo en el sistema de suministro de combustible o por una circunstancia inesperada, la válvula introducirá aire del exterior para evitar el colapso. En la siguiente imagen se esquematiza dicha operación.

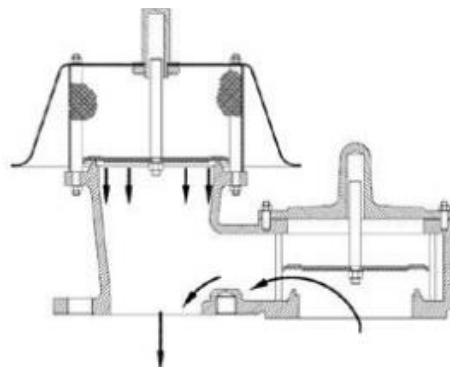


Imagen 15: Válvula de sobrepresión y alivio 2 [6]

En caso de que la empresa suministradora del depósito principal no pudiese incorporar directamente a éste la válvula descrita, SGS Bombas S.L. [13] ofrece válvulas para líquidos y gases que cumplen ambas funciones. Puesto que en este caso se liberaría nitrógeno, se necesitaría una válvula que incorpore las funciones de una válvula de sobrepresión y de alivio para gases.

2.2.2. Válvula de seguridad

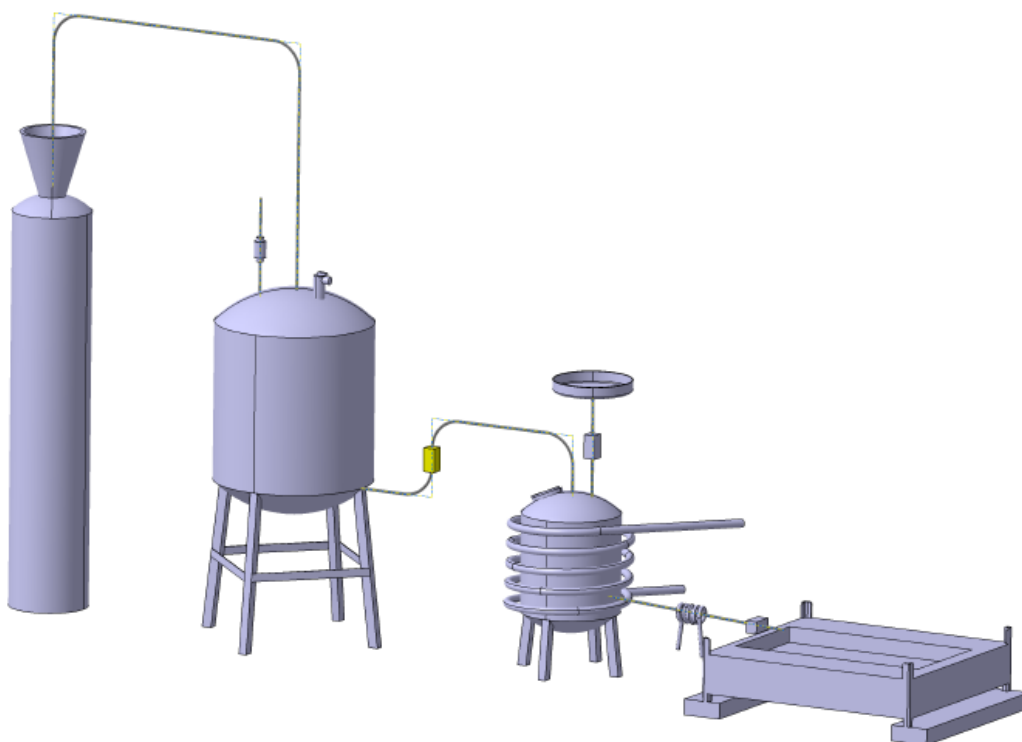


Imagen 16: Válvula de seguridad en el conjunto

Esta válvula se utilizará para mantener cerrado el conducto que hay entre ambos depósitos pero permitirá absorber al depósito principal los incrementos de presión del depósito secundario. Esto se debe a que al estar calentando combustible en el depósito secundario, se producirán volátiles que incrementarán la presión, pudiendo producirse una explosión. Como se muestra en la siguiente imagen, la válvula de seguridad sólo permite el paso de combustible en un sentido y, siempre y cuando, la presión de ese lado de la válvula sea superior a la presión de tarado. La presión de tarado se ajusta a través del tornillo superior de la válvula. También dispone de una palanca que en caso de emergencia se puede presionar manualmente y comprimirá el muelle, igualando la presión de ambos lados de la válvula.

Se ha localizado la empresa Provindus [14] como posible suministradora, ya que podría proporcionar una válvula que cumpla con los requisitos aquí establecidos. No sería necesario que tenga la configuración mostrada en la siguiente imagen, pero sí que cumpla con la función requerida de liberar al depósito principal combustible cuando éste supere la presión de 1,3bar.

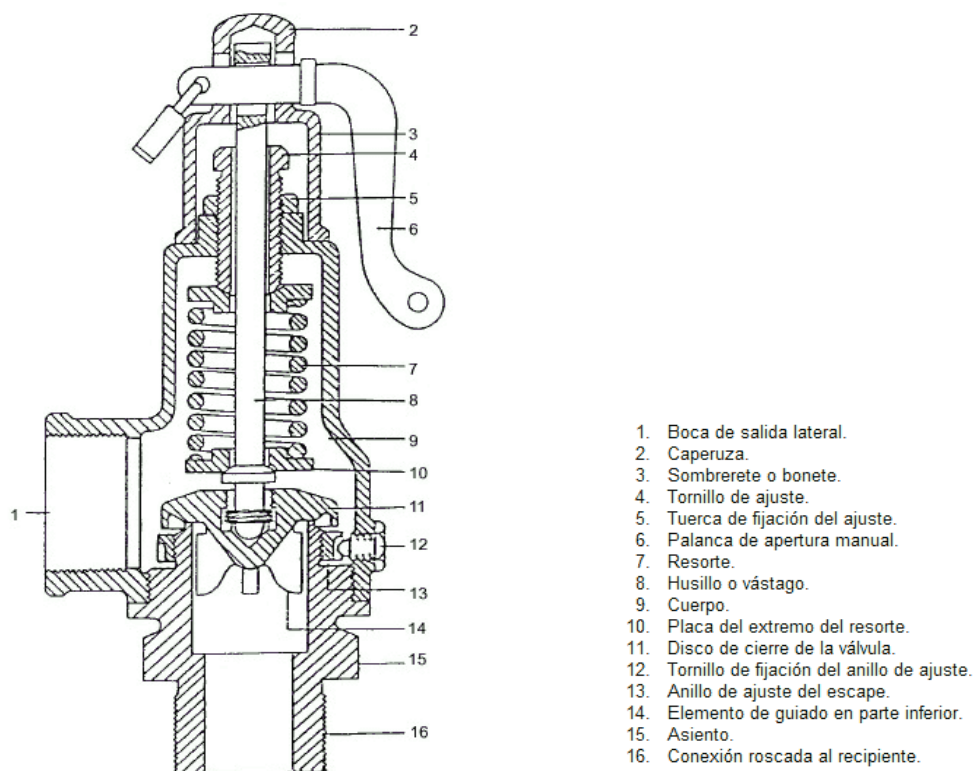


Imagen 17: Válvula de seguridad entre depósitos [6]

Ya que esta válvula seguridad sólo permite el paso de combustible desde el depósito secundario hasta el depósito principal (en condiciones de sobrepresión), es necesario añadir una válvula de control que permita el llenado del depósito secundario desde el depósito principal. Para ello se ha decidido incluir una válvula de tres vías y dos posiciones que se detalla a continuación.

2.2.3. Válvula de control

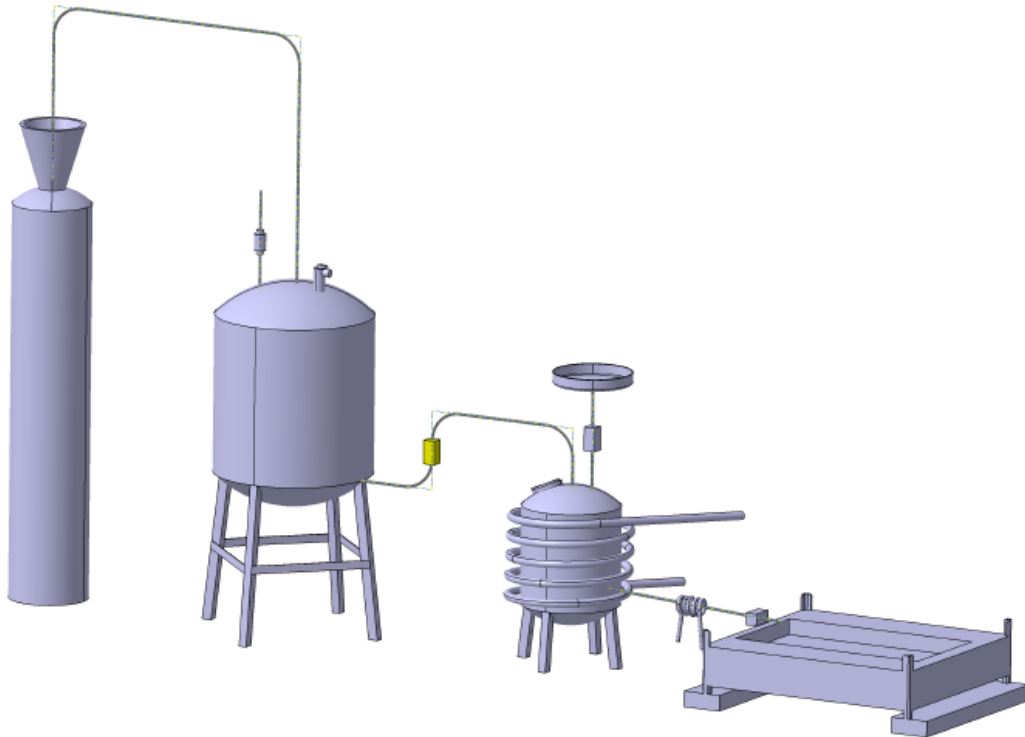


Imagen 18: Válvula de control en el conjunto

Como se ha indicado anteriormente, esta válvula se sitúa entre el depósito principal y el depósito secundario para permitir introducir el combustible al depósito secundario y, al mismo tiempo, asegurar que el combustible sobre presurizado volverá al depósito de almacenamiento. Por ello se requiere que sea una válvula de tres vías y dos posiciones, que posibilite elegir qué conducto se conectará al que sale del depósito principal.

Las dos situaciones en la que deberá trabajar esta válvula son las siguientes:

Por un lado, cuando se requiera el llenado del depósito secundario, la válvula se encontrará en la siguiente posición normal.

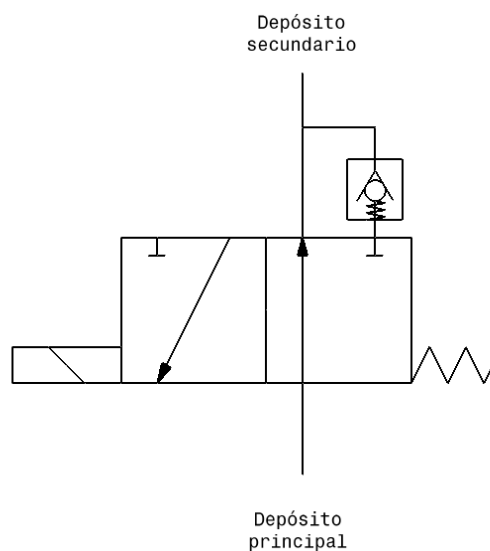


Imagen 19: Esquema de la posición normal válvula de control

Lo que permite el paso del combustible entre ambos depósitos, evitando su paso por la válvula de seguridad que hay entre ellos, ya que ésta sólo permitirá la circulación del combustible en el sentido inverso y cuando la presión del combustible aguas abajo exceda la presión de tarado de la válvula.

En cambio, cuando se esté calentando el combustible en el depósito secundario, la válvula se encontrará en la posición que se muestra en la imagen inferior.

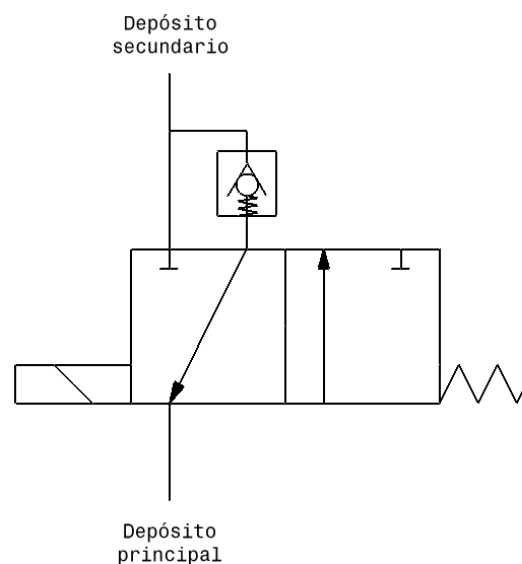


Imagen 20: Esquema de la posición 2 válvula de control

En esta posición de la válvula de control, el combustible no podrá circular del depósito principal al secundario, ya que entre ellos se encontrará la válvula de seguridad. Luego la única posibilidad de que el combustible pase a través de esta válvula de tres vías y dos posiciones en esta posición es que se supere en el depósito de calentamiento la presión

establecida como máxima para que se abra la válvula de seguridad y se libere parte del combustible hasta que se recupere la presión de tarado, momento en el que la válvula se cerrará y el combustible dejará de circular por la válvula de control hasta el depósito principal.

Esta válvula de tres vías y dos posiciones o válvula de control será accionada electrónicamente en un extremo gracias a una corriente eléctrica y con un muelle en el otro extremo que permita volver a la posición inicial una vez cese la corriente. Dicha corriente eléctrica será proporcionada por una tarjeta de salidas analógicas conectada al PC de control. De este modo el personal de control de la instalación podrá comandar la válvula gracias al SW instalado en el PC y conocerá en todo momento la posición de esta válvula.

Bürkert [15] es una empresa que posee gran variedad de electroválvulas de este tipo. Se ha seleccionado el modelo 6124T ya que es el que mejor se ajusta a los requisitos del sistema de suministro de combustible.

2.2.4. Depósito secundario o de calentamiento

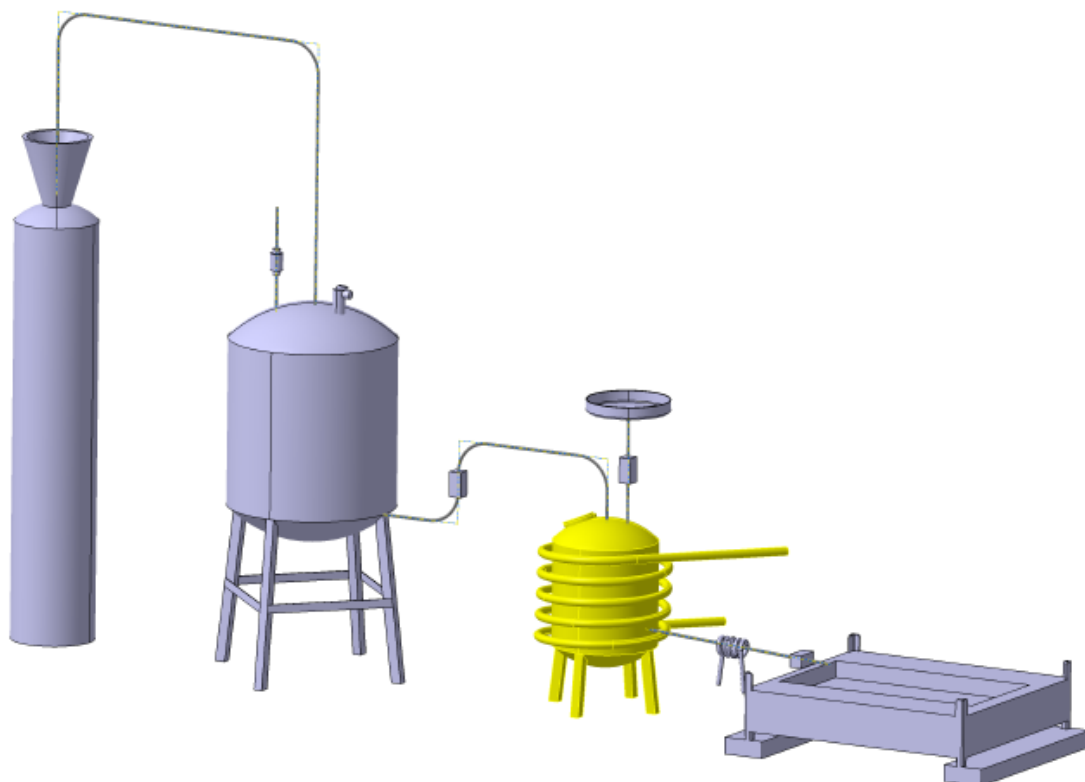


Imagen 21: Depósito secundario en el conjunto

Del mismo modo que en el caso del depósito secundario, se ha optado por la empresa Bachiller [11] para la fabricación del depósito secundario del sistema de suministro de combustible. Para facilitar el cumplimiento con los requerimientos establecidos por AIRBUS [1] se indican las características que debe poseer dicho depósito.

La función del depósito secundario del sistema de suministro de combustible es la de aportar al Jet A1 el salto térmico necesario para cumplir con el requerimiento de temperatura del ensayo [1]. Aunque posteriormente se conecte a una tubería calefactable para llevar al combustible hasta la piscina del ensayo evitando las pérdidas térmicas con el exterior, es este depósito el encargado de aumentar la temperatura del combustible, proporcionándole un salto térmico de hasta 80°C en el peor de los casos.

Este calentamiento del combustible se realizará regulando la potencia térmica suministrada al combustible en un tiempo fijo. Con esto, se posibilita al personal de control del sistema de suministro de combustible establecer los tiempos necesarios para adecuar el combustible a las condiciones establecidas en el ensayo [1]. Por tanto, es necesario tener un control de la temperatura en todo momento, puesto que el dimensionamiento de la resistencia se efectuará para sobrepasar la temperatura requerida, evitando no alcanzar la temperatura deseada en un caso extremo.

Debido a que el volumen de la piscina a llenar en un ensayo es de casi 2 litros, como se ha indicado en la Introducción de este Trabajo, se requerirá un depósito de 5 litros que permita realizar dos ensayo seguidos sin necesidad de poner en funcionamiento todo el sistema de suministro de combustible, ya que se supone un proceso largo ante determinadas condiciones ambientales. Las dimensiones del depósito son 0,2m de diámetro y posee una altura de 0,16m.

A continuación se incluye una imagen del depósito secundario con los componentes que debe tener y que serán descritos posteriormente.

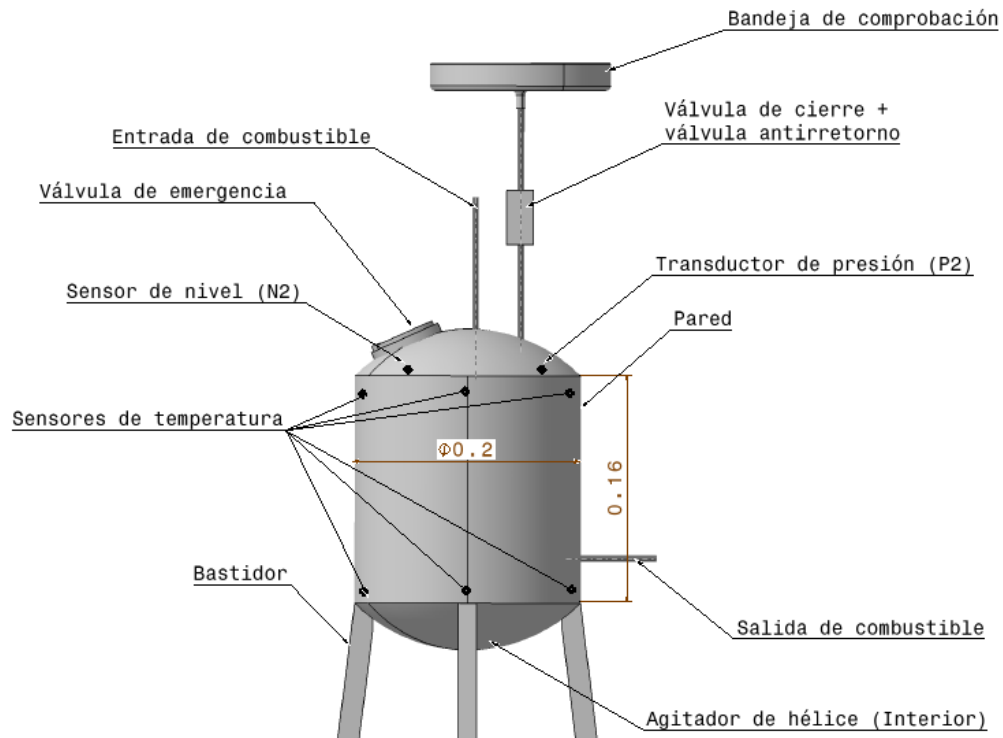


Imagen 22: Depósito secundario (cotas en m)

A continuación, se muestra una imagen con un detalle de las diferentes partes que compondrán la pared del depósito secundario.

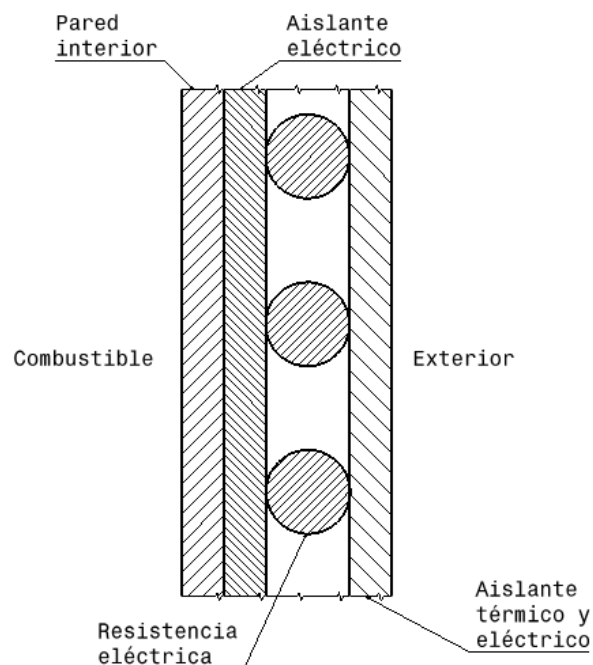


Imagen 23: Pared depósito secundario

Por tanto, el depósito de calentamiento de combustible deberá de componerse de los siguientes elementos para poder cumplir con los requisitos del ensayo:

- Pared interior:

La pared interior del depósito, la que estará en contacto con el combustible a calentar, será de acero inoxidable AISI 304, ya que posee buenas propiedades estructurales y térmicas. Al poseer un alto coeficiente de conductividad se podrá suponer que toda la pared interior obtendrá la misma temperatura, posibilitando una transferencia de potencia térmica al combustible más eficiente y uniforme.

- Aislante eléctrico:

La pared interior de acero del depósito de calentamiento estará cubierta por un aislante eléctrico que realice la función de interfaz entre dicha pared y la resistencia arrollada, descrita a continuación. La función de este elemento es la de aislar eléctricamente a la pared interior, ya que en caso contrario tendríamos una corriente eléctrica en contacto con el combustible pudiendo producir una explosión. Por tanto, deberá estar compuesto por un material que sea aislante desde el punto de vista eléctrico, pero buen conductor térmico, ya que otra de sus funciones es la de comunicar la potencia térmica desde la resistencia arrollada hasta la pared interior del depósito de la forma más eficiente posible, evitando pérdidas térmicas.

- Resistencia eléctrica arrollada:

Es la encargada del calentamiento del combustible hasta una temperatura requerida para la instalación. Consiste en un hilo de cobre que se arrollará alrededor de la lateral del depósito y estará conectada a la red eléctrica. Dispondrá de un relé que permitirá conectar o desconectarla de la red a través de una tarjeta de salidas analógicas conectada al PC de control y comandada gracias al SW instalado en él. De este modo, una corriente eléctrica recorrerá la resistencia eléctrica y, por efecto Joule, se calentará. Gracias a este fenómeno se podrá transferir la potencia térmica generada en la resistencia al combustible, a través de las dos capas intermedias que hay entre ellos.

- Pared de aislamiento:

Se requerirá una capa añadida a la pared del depósito que aísle térmica y eléctricamente a la resistencia arrollada y al depósito en general. Puede ser de fibra de vidrio ya que posee buenas propiedades como aislante térmico y eléctrico. Gracias a esta capa se asegura que no existirán grandes pérdidas térmicas con el exterior y no habrá accidentes por electrocución. La función principal de esta capa es la de posibilitar un calentamiento del combustible lo más eficiente posible, ya que la potencia térmica generada por la resistencia será transmitida hacia el elemento térmico, y por consiguiente hacia el combustible, y no hacia el exterior. Con ello se podrá dimensionar una resistencia eléctrica que necesite generar únicamente la

potencia calorífica requerida para aumentar la temperatura del combustible. Además, impedirá que haya una derivación de la corriente eléctrica que pase por la resistencia a otro elemento e impida el calentamiento del combustible al no calentarse la resistencia eléctrica.

- Entrada de combustible:

Se requiere de una entrada de combustible para posibilitar el llenado del depósito desde el depósito principal. Estará situada en la parte superior para asegurar el llenado por completo del depósito y que, en caso de un aumento de presión, se producirá en ese punto y el combustible sobre-presurizado podrá pasar al depósito principal como antes se ha expuesto.

- Salida de combustible a la piscina:

La salida de combustible a la piscina se posicionará en la parte inferior del depósito para poder aprovechar lo máximo posible la capacidad de éste. Además, al posicionarse en la parte inferior, se aprovechará la presión ejercida por el combustible en el depósito sobre la parte inferior para facilitar la salida del combustible a la velocidad que permita cumplir con los requerimientos establecidos para el ensayo de extinción.

- Nivel de combustible:

Del mismo modo que en el caso del depósito principal, en este depósito también se necesitará controlar en nivel de combustible que se encuentra en el interior de éste. Puesto que se podrán realizar al menos dos ensayos con un único proceso en el sistema de suministro de combustible, se requerirá conocer el nivel del que se dispone para saber si es posible o no continuar con los ensayos. Por ello se dispondrá de un orificio en la pared superior del depósito donde se acoplará el sensor de nivel correspondiente.

- Transductor de presión:

Se requiere, por motivos de seguridad, un sensor de presión que permita mantener controlado el estado del combustible en el interior del depósito. De este modo, en caso de que se considere un nivel de presión peligroso y la válvula de seguridad entre ambos depósitos no alivie la presión, se podría accionar la válvula de tres vías y dos posiciones que permita el paso de combustible al depósito principal, sin tener que abrir la salida a la piscina del ensayo y perder combustible en el sistema de suministro. Para poder emplazar este sensor en el depósito secundario se dispondrá de un orificio en la parte superior del depósito, donde se produciría el alivio de presión.

- Válvula de emergencia:

En la parte superior del depósito se incorporará una válvula de tapa (incorporada por la empresa suministradora del depósito [11]), que hará las funciones de válvula de emergencia. Esta tapa se rompería en caso de que se produjese un aumento de presión en el depósito

secundario y, o bien la válvula de seguridad entre depósitos no aliviase la presión del depósito secundario liberando combustible al principal, o bien la válvula de tres vías y dos posiciones no respondiera ante las órdenes del personal de control a cambiar la posición. La función de esta válvula de emergencia no es la misma que en el caso de la válvula de presión, sino que su función consiste en evitar que el depósito explote por completo, al producirse un aumento de presión. Por tanto en caso de producirse este hecho, sería necesario sustituir la válvula de emergencia y comprobar que no se ha producido ningún daño en el depósito que pueda producir futuras fugas de combustible, al reanudar el proceso de acondicionamiento del combustible a los requerimientos del ensayo.

- Agitador:

Se dispondrá de un agitador (incorporado por la empresa suministradora del depósito [11]) que favorezca la homogeneidad de la temperatura del combustible en el interior del depósito de calentamiento. Se trata de un agitador de hélice que posibilite la circulación del combustible en sentido circunferencial y en sentido vertical del depósito. Con esto se logra obtener una medida en cada sensor de temperatura lo más verídica posible de la temperatura del combustible, ya que no mide cada sensor la temperatura en un punto, sino que medirán una corriente continua de combustible. Otra de las razones por las que se opta por incluir este agitador al depósito de calentamiento es que evita que se caliente en exceso el combustible en zonas próximas a la pared interior, pudiendo producir situaciones de riesgo por sobrecalentamiento del combustible. Como última ventaja, cabe destacar que el incorporar el agitador conlleva una mayor eficiencia en el calentamiento del combustible. Esto se debe a que la transmisión de la potencia calorífica no se realiza por conducción a través del Jet A1 hasta tener en todo su volumen la temperatura requerida, sino que el agitador propicia que sea la pared del depósito la que transmita la potencia a cada parte del combustible que es forzado a pasar pegado a ella.

- Sensores de temperatura:

Para poder controlar la temperatura del combustible durante el proceso de calentamiento y poder establecer en qué momento se encuentra en las condiciones requeridas, se dispondrán unos sensores de temperatura en distintos puntos del interior del depósito. Se opta por introducir varios sensores de temperatura y posicionados en diferentes localizaciones para obtener una media de la temperatura del combustible lo más significativa posible. Por tanto, se requerirá de un orificio en la parte superior del depósito de calentamiento que permita introducir los sensores de temperatura en la posición elegida para cada uno de ellos. Es necesario asegurar que los sensores estén lejos de la pared interior de acero, ya que alcanzará altas temperaturas, y evitar que éstos se puedan caer al fondo del depósito por estar mal fijados. Gracias a estos sensores se podrá establecer en que momento el combustible se encuentra en condiciones para ser descargado a la piscina. Además proporcionarán al personal de control del sistema de suministro de combustible una lectura del calentamiento del Jet A1, pudiendo hallar un error en el proceso de calentamiento, ya sea en el agitador o en la resistencia.

- Bastidor:

Del mismo modo que en el caso del depósito de almacenamiento, se dispondrá de un bastidor que posibilite elevar del suelo al depósito de calentamiento. Al posicionar el depósito en una altura superior a la de la piscina se podrá utilizar la diferencia de presión gravitatoria para favorecer la descarga del combustible. Además, permitirá al personal de la instalación disponer del depósito en una posición más accesible para poder realizar las operaciones de puesta a punto y mantenimiento.

- Comprobación de llenado:

En la parte superior del depósito secundario habrá un orificio conectado a una tubería. En esta tubería habrá una válvula antirretorno y una válvula de compuerta (incorporadas por la empresa suministradora del depósito [11]), como se indica posteriormente (2.2.9 y 2.2.10, respectivamente). En el otro extremo de la tubería estará la bandeja de comprobación (2.2.8) para posibilitar expulsar todo el aire del interior del sistema de suministro de combustible y permitir al personal de control del sistema comprobar dicho hecho.

2.2.5. Tubería calefactable

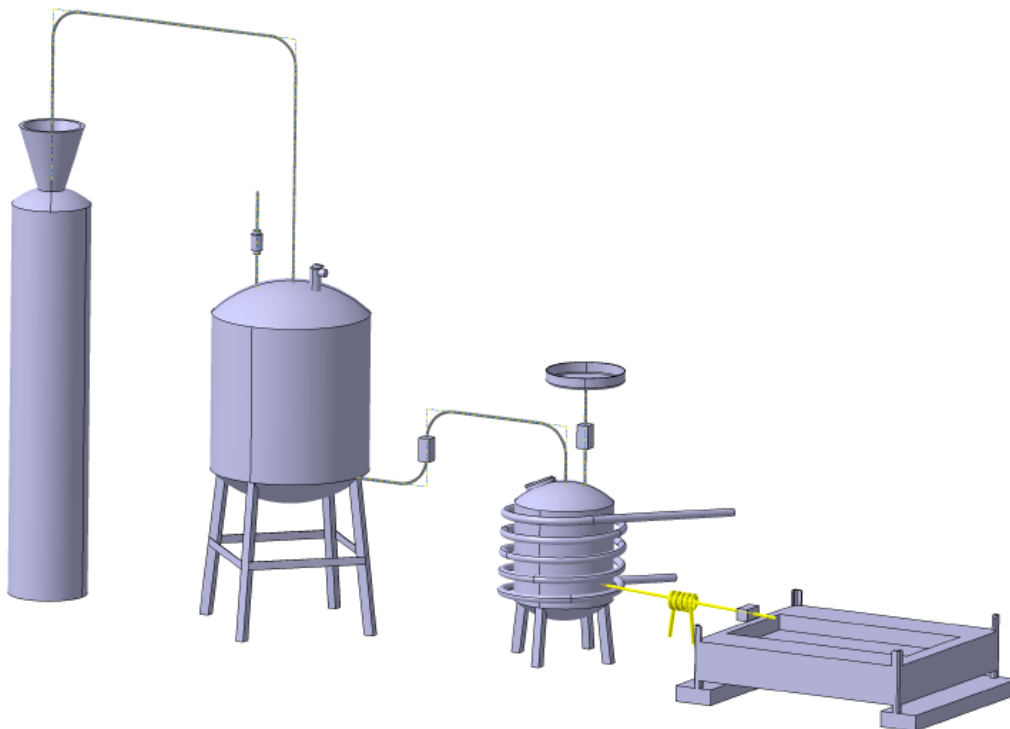


Imagen 24: Tubería calefactable en el conjunto

Aguas abajo del depósito de calentamiento las tuberías evitarán las pérdidas térmicas del combustible calentado en el depósito por la acción del ambiente durante su transporte hasta la descarga en la piscina del ensayo.

Tecno Products S.L. [16] es una empresa que fabrica tuberías de este tipo. En la siguiente imagen se muestran los componentes generales de dichas tuberías.



Imagen 25: Tubería calefactable [16]

Las tuberías aquí descritas tendrán el mismo funcionamiento que el depósito de calentamiento y cumplirán con las siguientes características.

Se compondrán de una pared interior de PTFE liso que estará en contacto con el combustible. Dicho material posee una rugosidad despreciable de 0,0008mm que será empleada para realizar los cálculos.

Esta pared interior estará cubierta por un elemento que posibilite el paso de la potencia térmica requerida al combustible, pero que evite transmitir la corriente eléctrica que alimenta a la resistencia arrollada. Como en el caso del depósito de calentamiento, es necesario asegurar que el combustible no se encuentre en contacto con un elemento cargado eléctricamente ya que puede producirse una explosión y para esto se incluye el elemento descrito.

Alrededor de esta última capa se arrollará una resistencia eléctrica que, aprovechando el efecto Joule anteriormente descrito, generará un flujo de potencia térmica necesario para mantener el combustible descargado del depósito secundario a la temperatura del requerimiento. Por tanto, esta resistencia estará conectada a la red eléctrica que le comunicará la corriente eléctrica necesaria.

Para evitar accidentes por electrocución o por quemaduras del personal de la instalación se añade una capa de un elemento aislante térmico y eléctrico. Además, gracias a este elemento, se consigue aumentar la eficiencia del proceso de evitar las pérdidas con el exterior, ya que la potencia térmica generada por la resistencia es conducida casi en su totalidad al combustible. Esto se debe a que el elemento térmico por el que es arrollada la

resistencia poseerá un coeficiente de conductividad térmica muy superior al elemento aislante.

Las tuberías aquí descritas tendrán un diámetro interior normalizado de media pulgada (12,7mm) y una longitud total de 3,4m. Siendo dos tuberías de 1,5m y otra de 0,4m. El primer tramo de tuberías de 1,5m conectarán la descarga del depósito de calentamiento a una válvula de descarga que será detallada posteriormente, incluyendo un sensor de caudal entre ellas. El segundo tramo será de la válvula de descarga a la piscina del ensayo.

Para poder asegurar que el combustible cumple con las condiciones térmicas requeridas en el ensayo, se dispondrá un sensor de temperatura que registre y posibilite al personal de control del sistema de suministro de combustible establecer en qué momento se puede comandar la válvula de descarga para liberar el combustible en la piscina del ensayo. Además, gracias a este sensor de temperatura, se podrán realizar pruebas previas a los ensayos que permitan relacionar la temperatura ambiente con el tiempo estimado de funcionamiento de la resistencia de la tubería. De este modo se conseguirá disminuir los tiempos de funcionamiento del sistema de suministro de combustible, posibilitando la realización de un mayor número de ensayos en un día.

2.2.6. Válvula de descarga

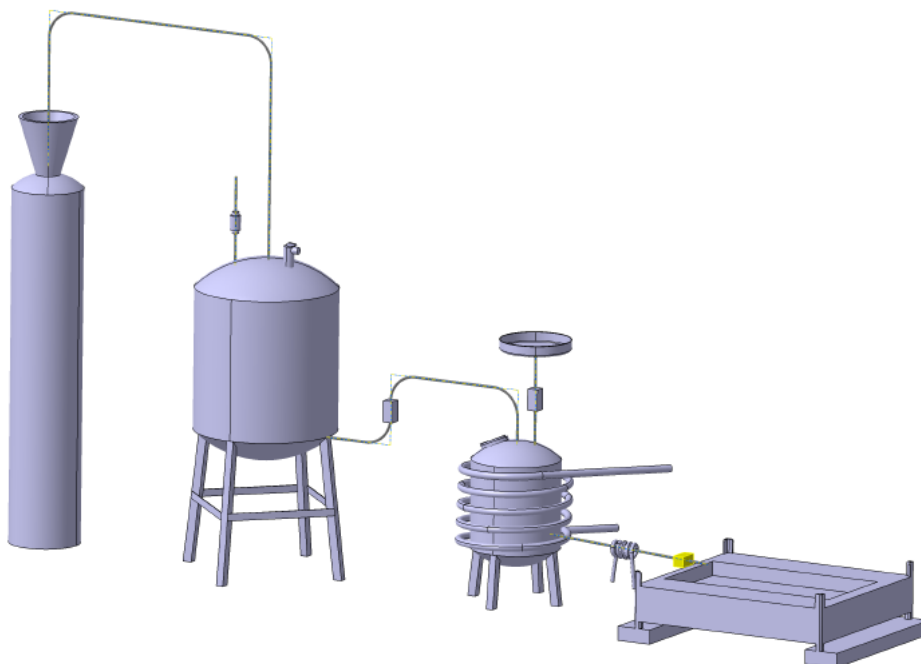


Imagen 26: Válvula de descarga en el conjunto

Del mismo modo que en el caso de la válvula de control entre ambos depósitos, esta válvula podrá ser suministrada por Bürket [15]. Se requerirá el modelo 6124A, ya que reúne las características aquí descritas.

Esta válvula es la denominada de descarga y se trata de una válvula de una vía y dos posiciones colocada al final del segundo tramo de tubería de 1,5m de longitud y al principio del tercero de 0,4m, según el sentido de circulación del combustible. Su función es la de permitir liberar el combustible en la piscina de ensayo cuando el combustible adquiriera la temperatura requerida. Puesto que los sensores de temperatura posibilitan al personal de control del sistema de suministro de combustible conocer el estado del Jet A1. La válvula será accionada a través de una corriente eléctrica, generada por una tarjeta de salidas analógicas, situándose en la posición 2 (Imagen 28: Esquema de la posición 2 válvula de descarga) y, una vez se elimine dicha corriente, volverá la posición normal (Imagen 27: Esquema de la posición normal válvula de descarga) gracias al muelle que posee. Normalmente y por motivos de seguridad, estará colocada en la posición 1 o normal, mostrada en la siguiente imagen.

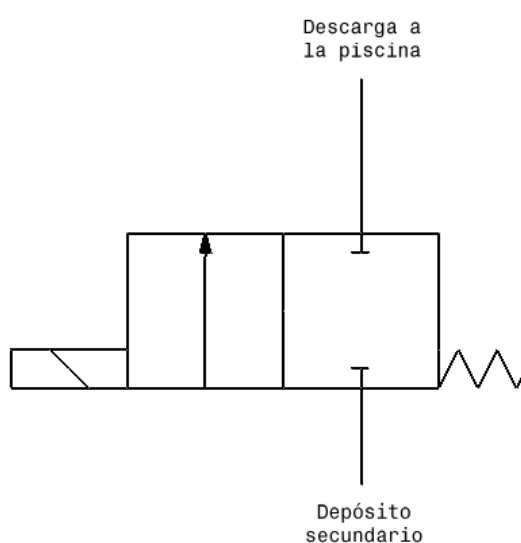


Imagen 27: Esquema de la posición normal válvula de descarga

En esta posición el combustible no será vertido a la piscina del ensayo. Esta posición será utilizada para llenar la instalación de combustible y para acondicionar el Jet A1 a las condiciones requeridas en el ensayo [1]. De este modo, en caso de que el combustible haya sido calentado en exceso en el depósito secundario o las tuberías calefactables del primer y segundo tramo no hayan estado encendidas el tiempo necesario, el combustible no será descargado en la piscina del ensayo para permitir al personal de control ajustar los parámetros necesarios en el sistema de suministro para conseguir los 68°C de temperatura en la descarga.

En cambio si el combustible ya ha alcanzado la temperatura requerida, se proporcionará la corriente eléctrica a la válvula para que pase a la segunda posición, como se muestra en la siguiente imagen.

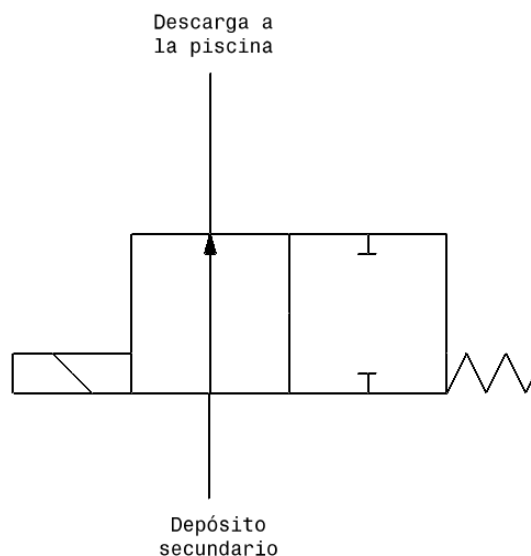


Imagen 28: Esquema de la posición 2 válvula de descarga

En esta posición la válvula de descarga posibilitará que el combustible pase al tercer tramo de tubería calefactable para ser descargado a la piscina del ensayo. Cabe destacar que el accionamiento de esta válvula debe ser muy preciso puesto que de él depende que se cumpla con uno de los requerimientos del ensayo. Debido a que se requiere el control del volumen descargado, es necesario establecer el tiempo de apertura de la válvula en función del caudal que pasa a través de las tuberías calefactables.

2.2.7. Bala de nitrógeno

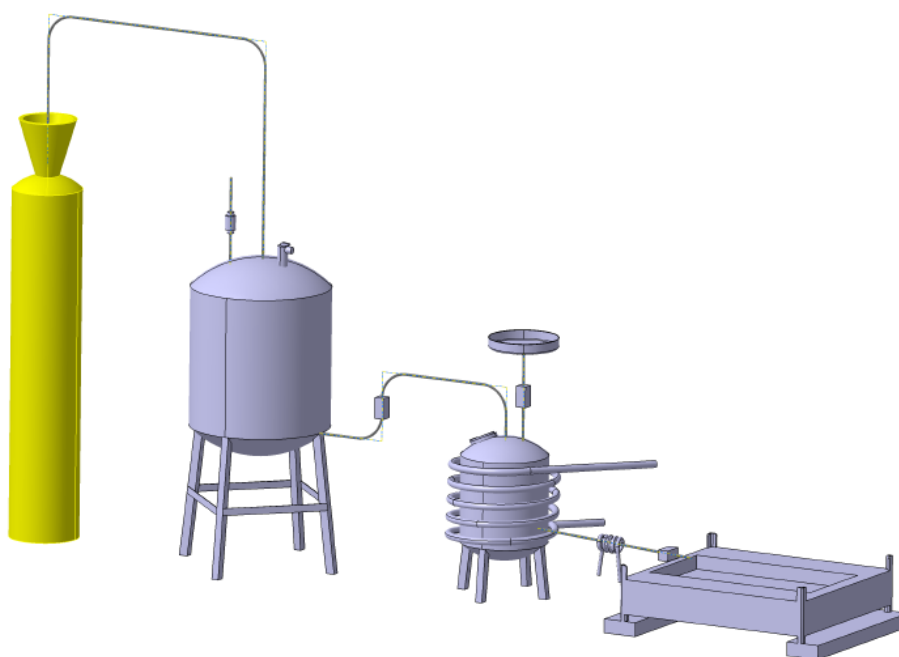


Imagen 29: Bala de nitrógeno en el conjunto

Como se ha indicado anteriormente, el nitrógeno se utilizará para presurizar la instalación y para asegurar la ausencia de oxígeno en contacto con el combustible, evitando una ignición espontánea o una explosión. Esta bala o depósito de nitrógeno irá conectada a la parte superior del depósito de almacenamiento, puesto que es necesario aportar dicha presión en todo el sistema de suministro de combustible para asegurar, por diferencia de presión con la descarga, la circulación del combustible aguas abajo de la bala de nitrógeno.

Para poder efectuar un correcto control sobre este depósito de nitrógeno se requerirá que esté equipada con un manómetro y con una válvula de regulación en la salida. El manómetro indicará la presión en el interior de la bala que permitirá conocer el nivel de nitrógeno del que se dispone para introducirlo en el sistema de suministro. Por otro lado, gracias a la válvula de regulación en la descarga del nitrógeno, el personal de control de la instalación podrá elegir la presión a la que desea que esté la superficie de combustible en contacto con el nitrógeno.

De este modo, en caso de que se desee variar la velocidad de descarga del combustible a la piscina por motivos del ensayo, se podrá abrir más esta válvula, aumentando la presión en la línea de combustible y, por tanto, aumentando el caudal de salida de Jet A1.

Se ha elegido este gas ya que se trata de un gas inerte que no reacciona con el combustible ni es perjudicial para la salud ni para el medio ambiente, constituye un gas ideal para su utilización en instalaciones de este tipo.

En cuanto a productos comerciales que satisfagan las características necesarias para el correcto funcionamiento del sistema de suministro de combustible, Praxair [17] puede proporcionar dicha bala de nitrógeno.

2.2.8. Bandeja de comprobación de llenado

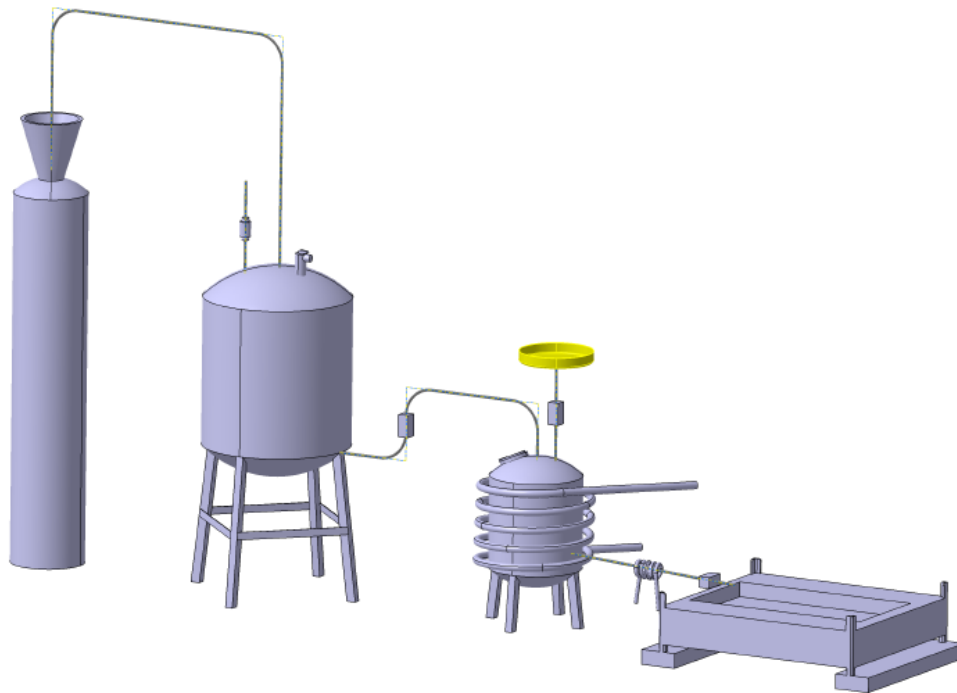


Imagen 30: Bandeja de comprobación en el conjunto

Para poder realizar un correcto llenado y purgado de la instalación, se requiere una bandeja que permita verificar que la instalación se ha llenado de combustible según lo establecido. Para ello en la parte superior del depósito secundario se incluirá una tubería vertical sobre la que se acoplará esta bandeja. Para poder disponer de tiempo desde que el personal de control determina que el sistema de suministro de combustible está completamente lleno y libre de aire, hasta que se detiene la introducción de combustible, la geometría de la bandeja estará determinada. Deberá de disponer de un diámetro de una magnitud mayor que el alto, evitando así que el combustible se desborde fácilmente de la bandeja.

Como se ha indicado anteriormente (2.2.4) este elemento será incluido en el depósito secundario por la empresa suministradora ya que no posee características importantes en el diseño del sistema de suministro de combustible.

2.2.9. Válvula antirretorno

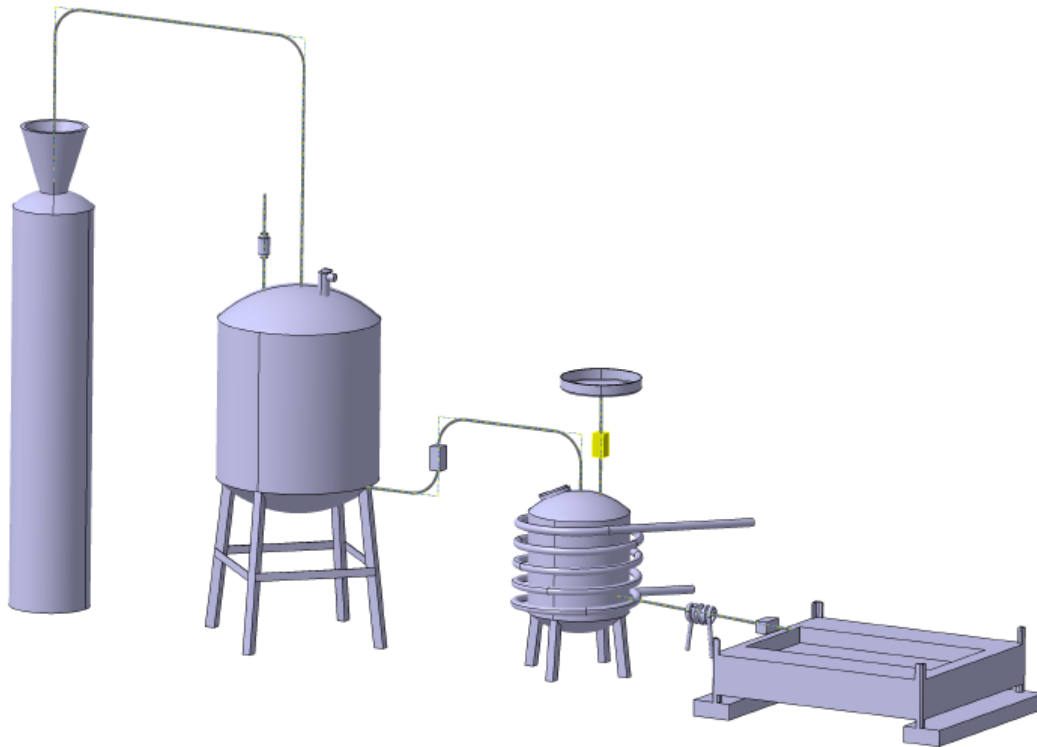


Imagen 31: Válvula antirretorno en el conjunto

Para poder efectuar correctamente la purga de aire del sistema de suministro de combustible, se incluirá una válvula antirretorno que evite que el aire se introduzca en la instalación en su puesta a punto. En cambio, deberá de permitir la salida de combustible hasta la bandeja para poder efectuar las tareas de comprobación.

Como se ha indicado anteriormente (2.2.4) este elemento será incluido en el depósito secundario por la empresa suministradora ya que no posee características importantes en el diseño del sistema de suministro de combustible.

2.2.10. Válvula de cierre

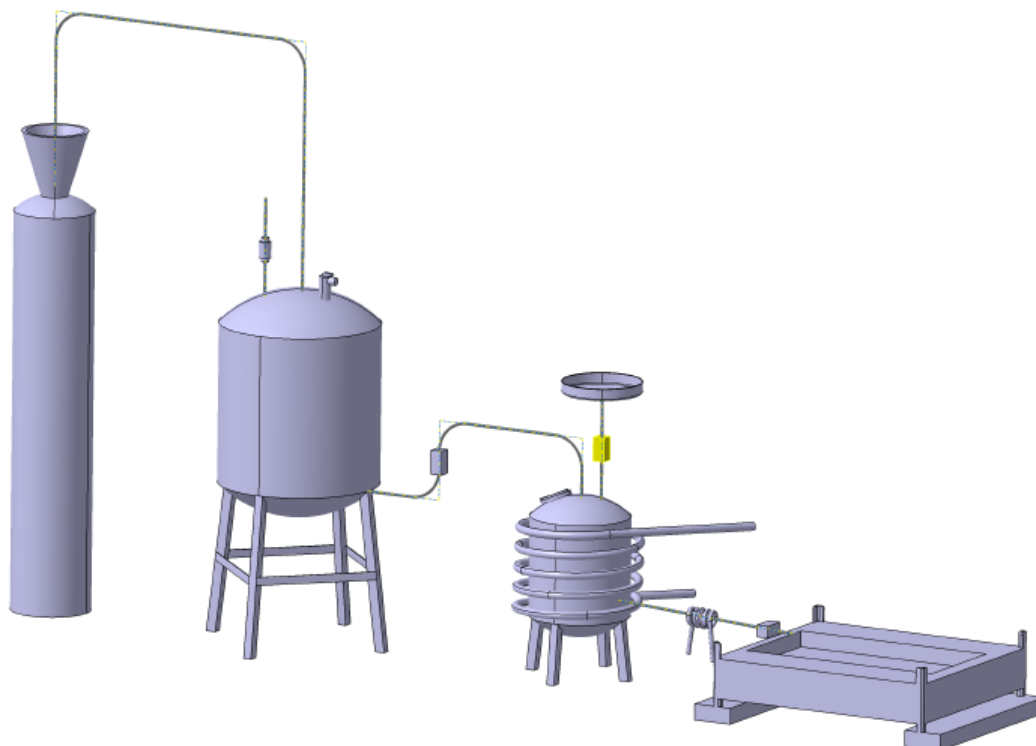


Imagen 32: Válvula de cierre en el conjunto

Esta válvula únicamente tiene la función de cerrar la tubería que se acopla a la parte superior del depósito secundario y que incluye la bandeja de comprobación y la válvula antirretorno. Se ha determinado que se trate de una válvula compuerta por su fácil operatividad y ya que no produce una gran pérdida de carga al combustible. Esta válvula de compuerta es necesaria ya que en caso de no incorporarse a la instalación se podría producir un accidente o fallo en el sistema de suministro de combustible, ya que al ser calentado el combustible, tenderá a aumentar de volumen, por lo que irá saliendo el combustible por la bandeja de comprobación y tendremos combustible caliente en contacto con el aire exterior y una posible fuente de calor que lo haga incendiarse. Por ello, una vez realizada la purga de aire y comprobación de llenado del sistema de suministro, esta válvula se cerrará y se podrá comenzar con el funcionamiento normal, como se explica posteriormente.

Como se ha indicado anteriormente (2.2.4) este elemento será incluido en el depósito secundario por la empresa suministradora ya que no posee características importantes en el diseño del sistema de suministro de combustible.

En la siguiente imagen se muestra el conjunto de elementos que componen el conjunto de comprobación.

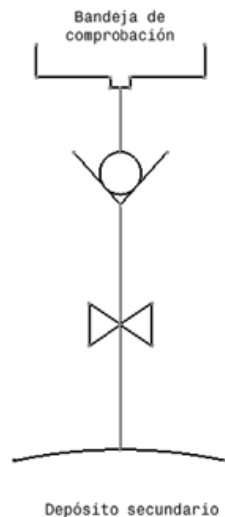


Imagen 33: Esquema conjunto comprobación

2.2.11. Diseño definitivo

Por tanto, el diseño definitivo de la instalación queda determinado. En la siguiente imagen se muestran los elementos que forman el sistema de suministro de combustible.

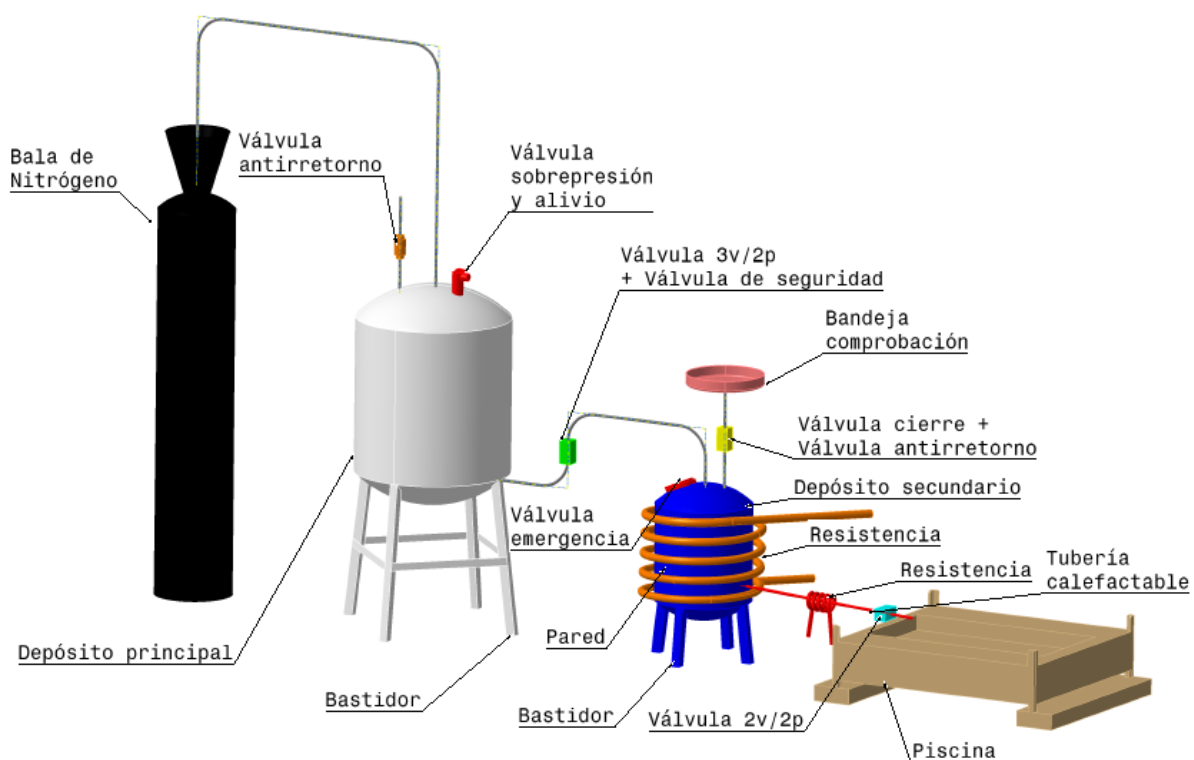


Imagen 34: Diseño definitivo

2.3. Estudio hidráulico

Es necesario realizar el estudio hidráulico de la instalación para determinar la presión a la que debe de descargarse el nitrógeno en el depósito principal. Se realizarán dos estudios para determinar dicha presión. Uno abordará la necesidad de llenar el depósito secundario de combustible, haciendo frente al incremento de altura entre ambos depósitos, a las pérdidas de carga locales y a la fricción del combustible a lo largo del conducto de transporte. El otro estudio establecerá la presión necesaria en el depósito principal que asegure en la descarga a la piscina el caudal mínimo requerido en el ensayo. Para ello se calculará la presión en el depósito secundario necesaria para cumplir con el requerimiento y con ella se establecerá que presión se necesita en el principal. Una vez realizados los dos estudios, se analizará que situación es más restrictiva para establecer la presión mínima del nitrógeno en el depósito principal.

2.3.1. Primer caso de estudio

En este estudio se calculará la presión del nitrógeno en el depósito principal (p_1) que asegure un caudal hipotético de entrada al depósito secundario. Con ello se podrá asegurar que, con la presión suministrada por la bala de nitrógeno, el combustible se transportará de un depósito a otro. Como se ha indicado anteriormente, uno de los objetivos de diseño de este sistema de suministro de combustible es evitar que el Jet A1 adquiera presión innecesariamente ya que va a ser calentado. Por ello, en este estudio se buscará calcular la mínima presión necesaria en el depósito principal que asegure el correcto funcionamiento de la instalación.

Para poder obtener un margen de seguridad en el cálculo hidráulico, se establecerán parámetros restrictivos que proporcionen una necesidad de presión mayor, obteniendo una situación desfavorable. Esto se debe a que se busca presurizar lo menos posible el combustible.

En la siguiente imagen se representa un esquema de la parte del sistema de suministro de combustible involucrada en el caso de estudio 1, indicando los parámetros necesarios para el estudio.

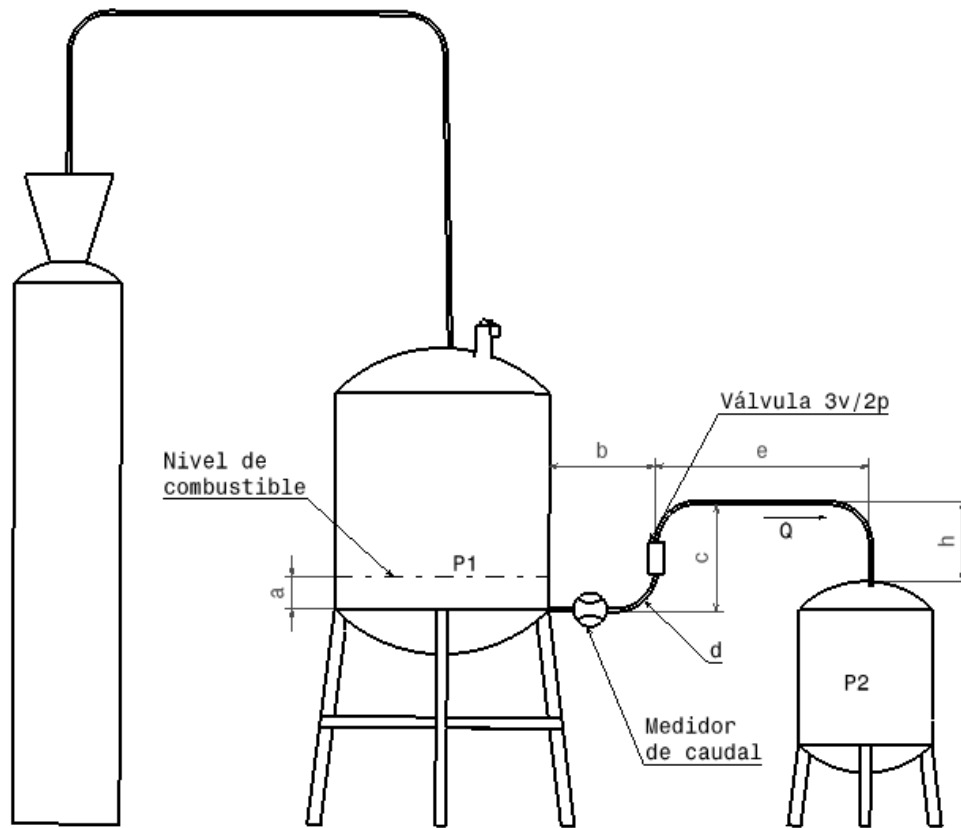


Imagen 35: Esquema caso de estudio 1

Las dimensiones de la instalación son las siguientes:

$a=0\text{m}$; $b=0,7\text{m}$; $c=1,2\text{m}$; $h=0,1\text{m}$; $d_{\text{tubería}}=0,0127\text{m}$; $e=0,4\text{m}$

A partir de la ecuación de Bernoulli con pérdidas [18], se realizará el cálculo requerido para resolver este problema de estudio.

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \left\{ f \left(\text{Re}_d, \frac{\varepsilon}{d} \right) \frac{L}{d} + \sum K_m \right\} \quad (\text{Ec.1})$$

Dónde los términos de la ecuación 1 para el primer caso de estudio son:

- P_1 es la presión de la superficie de combustible en contacto con el nitrógeno dentro del depósito principal.
- ρ es la densidad del combustible.
- v_1 es la velocidad del combustible en el depósito principal al ser desalojado
- g es la constante de gravedad.
- z_1 es la altura de la superficie de combustible en contacto con el nitrógeno dentro del depósito principal.

- P_2 es la presión del combustible en la parte superior del depósito secundario.
- v_2 es la velocidad con que es llenado el depósito secundario medido en la tubería que está en su parte superior.
- z_2 es la altura a la que se acopla la tubería que transporta el fluido al depósito secundario.
- f es el coeficiente de fricción determinado usando el Diagrama de Moody.
- Re_d es el número de Reynolds para un fluido que pasa por el interior de un conducto de diámetro determinado.
- ϵ es la rugosidad de la cara interior del conducto que transporta el combustible.
- d es el diámetro interior del conducto que transporta el combustible.
- L es la longitud total del conducto que transporta el combustible.
- $\sum K_m$ es el sumatorio de todas las pérdidas de carga locales que experimenta el combustible a su paso de un depósito a otro.

Consideraciones de cálculo

Puesto que el área lateral del depósito es mucho mayor que el diámetro de éste al cuadrado, se puede eliminar el segundo término de la ecuación. Esto se debe a que la velocidad experimentada por el combustible en el depósito principal al ir vaciándose se puede considerar despreciable, respecto a la que experimenta a lo largo de la tubería que existe entre ambos depósitos.

Se supondrá que la cantidad de combustible que hay en el depósito principal a la hora de realizar el cálculo es nulo, evitando la contribución de presión gravitatoria de éste en el cálculo del transporte de Jet A1.

Otro de los parámetros a establecer es la temperatura del combustible almacenado a la hora de calcular la presión necesaria en el depósito. Puesto que la presión a calcular es p_1 y el objetivo de diseño es que sea lo menor posible, la situación más desfavorable es una temperatura baja. Esto se debe a que a menor temperatura, mayor densidad, luego habrá mayor presión requerida en el depósito al ser directamente proporcionales en la Ecuación 1. Luego, se supondrá para el estudio que el Jet A1 estará a 270K, sabiendo que puede ser una temperatura asumible en el exterior.

Las pérdidas de carga locales en el tramo del sistema de suministro estudiado han sido determinadas por la tabla del Anexo I. Puesto que se quiere estudiar el caso más desfavorable para la seguridad del diseño del sistema de suministro de combustible, se han elegido las mayores pérdidas locales.

Se utiliza el Diagrama de Moody, representado en el Anexo I, para calcular las pérdidas debidas a la fricción del combustible con las paredes interiores de las tuberías. A pesar de que el Diagrama de Moody es utilizado para agua a 15,5°C, se ha decidido utilizarlo para este

estudio ya que proporcionará una aproximación y será un valor muy pequeño respecto a los demás términos.

Para realizar este primer estudio se ha establecido un caudal de referencia a la entrada al depósito secundario para poder calcular la presión necesaria en el depósito principal. El caudal estimado no es excesivamente alto ya que, el objetivo principal del diseño del sistema de suministro de combustible es realizar un sistema seguro antes que uno con un funcionamiento rápido. Si se hubiese estimado un caudal muy alto, se habría requerido una presión muy alta en el depósito principal y, por consecuencia, en toda la línea de combustible del sistema de suministro de combustible. Esto habría llevado a correr mayores riesgos al calentar el combustible hasta los 68°C requeridos en el ensayo.

Al realizarse el llenado del depósito secundario, la válvula de cierre permitirá que la instalación de suministro de combustible esté abierta. Por lo tanto, para realizar el estudio, se podrá establecer que la presión a la entrada del depósito secundario (p_2) será igual a la presión atmosférica (p_a).

Las tuberías de toda la instalación tienen un diámetro interior de media pulgada (12,7mm), para minimizar los costes ya que se trata de un diámetro normalizado.

Por tanto, las variables conocidas de la ecuación 1 referentes al caso de estudio aquí descrito son:

Dimensiones: $a=0\text{m}$; $b=0,7\text{m}$; $c=1,2\text{m}$; $h=0,1\text{m}$; $d_{\text{tubería}}=0,0127\text{m}$; $e=0,4\text{m}$

Pérdidas de carga: $K_{\text{entrada}}=0,5$; $K_{\text{codos}}=3 \times 2=6$; $K_{\text{caudalímetro}}=1$; $K_{\text{válvula control}}=0,1$ [15]

Combustible: $T_{\text{combustible}}=270\text{K}$; $\rho_{\text{combustible}}=814,8\text{kg/m}^3$; $\mu_{\text{combustible}}=2,693 \times 10^{-3}\text{kg/ms}$;
 $Q=10\text{l/min}=0,6\text{m}^3/\text{h}$

Tubería: $e_{\text{PTFE}}=0,0008$

A partir de la ecuación 1, se realizan los siguientes cálculos:

Como $A_{\text{depósito}} \gg d^2$ se puede despreciar el segundo término de la ecuación.

Al considerarse el caso más desfavorable se supone que $z_1=0$.

Como se ha indicado anteriormente, el sistema de suministro estará abierto luego $p_2=p_a$.

Despejando de la ecuación 1 el término de interés:

$$p_1 - p_a = p_{lm} = \rho g (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \left\{ 1 + f \frac{L}{d} + \sum K_m \right\} \quad (\text{Ec. 2})$$

Se calcula la velocidad con que sería transportado el combustible dado el caudal estimado.

$$v_2 = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,6}{\pi \cdot 0,0127^2 \cdot 3600} = 1,1316 \frac{m}{s} \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:

- Q es el caudal estimado de combustible usado para verificar que es transportado.

Se calcula el número de Reynolds relativo al paso de un fluido por el interior de un conducto.

$$Re_d = \frac{\rho v_2 d}{\mu} = \frac{814,81 \cdot 1,1316 \cdot 0,0127}{2,693 \cdot 10^{-3}} = 5056,8 \quad (\text{Ec. 4})$$

Dónde:

- μ es la viscosidad dinámica del Jet A1 a 270K de temperatura.

Se calcula el cociente entre la rugosidad relativa del material interior del conducto y el diámetro interior del conducto.

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{0,002}{12,7} = 6,3 \cdot 10^{-5} \quad (\text{Ec. 5})$$

Con los valores obtenidos en las ecuaciones 4 y 5, se obtiene del diagrama de Moody recogido en el Anexo I que el coeficiente de fricción es:

$$f = 0,036$$

Por tanto se trata de un flujo transitorio.

Se calculan los últimos términos necesarios para resolver la ecuación 2.

$$\sum K_m = 7,6; L = 2,4m$$

Por tanto, sustituyendo todos los valores ya calculados anteriormente, se obtiene a través de la ecuación 2 el siguiente resultado de presión manométrica en el interior del depósito principal:

$$p_{lm} = 9,81814,81,1 + \frac{1}{2} 814,81,316^2 \left\{ 1 + 0,036 \frac{2,4}{0,0127} + 7,6 \right\} = 19660 Pa$$

Realizando el cambio de unidades:

$$p_{1m} = 19660 Pa \approx 0,2 bar$$

Se tomará $p_{1m} = 0,2 bar$ como valor de la presión manométrica en el interior del depósito principal, que será proporcionada por el nitrógeno.

2.3.2. Segundo caso de estudio

El objetivo de este estudio es establecer la presión que se necesita en el depósito secundario, debida a la presión generada por el Nitrógeno en el depósito principal, para asegurar que el combustible es vertido en menos de 5 segundos. En caso afirmativo, será preferible que el combustible se descargue en la piscina lo más rápido posible para poder iniciar el fuego sin que éste se enfríe y baje de los $38^{\circ}C$, por encima de los cuales comienza a liberar volátiles, permitiendo la ignición ante una fuente de calor. Por tanto, la secuencia a seguir para el cálculo de la presión requerida en el depósito secundario es la siguiente:

Primero se realizará un cálculo similar al del anterior caso de estudio, en el que se establecerá la presión del depósito secundario necesaria para descargar el volumen de combustible en el tiempo requerido. En caso de ser una presión superior a la atmosférica, significará que se necesita presurizar el depósito secundario para cumplir con el requerimiento, por lo que será necesario calcular qué presión ha de ejercer el nitrógeno en el depósito principal para poder tener la presión requerida en el depósito secundario.

En caso contrario se podrá afirmar que el combustible será descargado en el tiempo indicado, por lo que no será necesario establecer una presión determinada en el depósito secundario. Por tanto, se podrá asegurar que el caso de estudio que determinará la presión que debe suministrar el nitrógeno al sistema de suministro de combustible es el anterior.

A continuación se muestra una imagen con el tramo del sistema de suministro de combustible a estudiar en este punto:

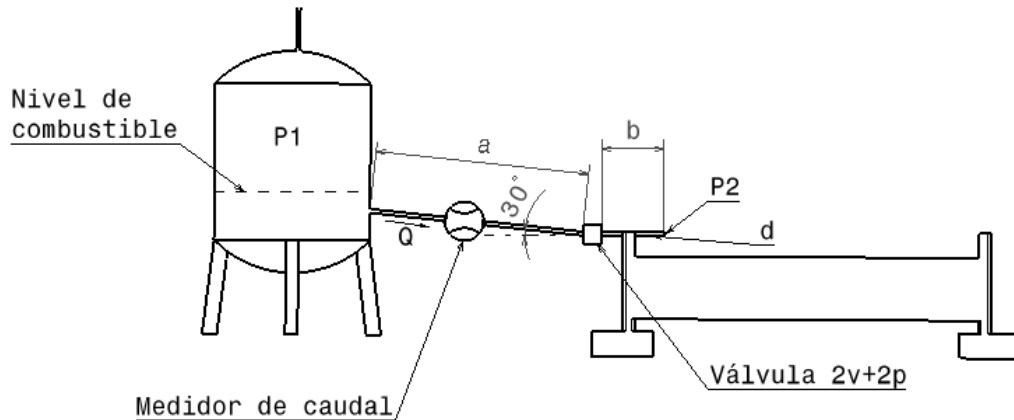


Imagen 36: Esquema caso de estudio 2

Las dimensiones de la instalación son las siguientes:

$$a=3\text{m}; b=0,4\text{m}; d_{\text{tubería}}=0,0127\text{m}$$

Como en el caso de estudio anterior, se aplica la ecuación 1 para poder resolver el problema aquí expuesto.

Dónde los términos de la ecuación 1 para el segundo caso de estudio son:

- P_1 es la presión de la superficie de combustible en el depósito secundario.
- v_1 es la velocidad del combustible en el depósito secundario al ser desalojado
- z_1 es la altura de la superficie de combustible dentro del depósito secundario.
- P_2 es la presión del combustible en el final de la tubería de descarga a la piscina.
- v_2 es la velocidad con que es descargado el combustible en la piscina del ensayo.
- z_2 es la altura del final de la tubería de descarga a la piscina.
- $\sum K_m$ es el sumatorio de todas las pérdidas de carga locales que experimenta el combustible a su paso desde el depósito secundario hasta la descarga en la piscina del ensayo.

Consideraciones de cálculo

Del mismo modo que en el caso anterior se puede despreciar la velocidad del combustible a su paso por el depósito secundario ya que se obtiene, como se muestra posteriormente, una velocidad muy baja. Por lo tanto, para este cálculo se supone que el depósito no se descarga en el instante de estudio aquí descrito.

En el anterior caso de estudio se supuso que el depósito principal estaba vacío de combustible para representar el caso más restrictivo. En este caso esta hipótesis no puede realizarse ya que en el funcionamiento del sistema de suministro de combustible no puede darse, pero se ha establecido que el depósito secundario tiene $1/3$ de su volumen con

combustible. Esta hipótesis se debe a que, al tener en torno a 5 litros de capacidad y en cada ensayo se requieren 1,85 litros de combustible, puede darse una situación en la que se puedan realizar 3 ensayos seguidos. Por tanto, la situación aquí resuelta representará el caso más desfavorable para el objetivo de verter el combustible en el menor tiempo posible.

Uno de los parámetros a establecer, como en el caso anterior, es la temperatura del combustible calentado para poder calcular la presión necesaria en el depósito. Al contrario que anteriormente, en este caso no se puede suponer una temperatura tan baja del combustible para simular el caso más desfavorable, ya que se trata de combustible calentado debido a la necesidad de cumplir con el requerimiento de temperatura del ensayo. De todos modos, se puede suponer una temperatura de referencia más baja que la requerida para asumir un margen de seguridad en el cálculo. Por tanto, puesto que la temperatura requerida es de 68°C y se obtendrán los parámetros del combustible de tablas con la temperatura expresada en Kelvin, se toma como temperatura hipotética del combustible: 335K.

Las pérdidas de carga locales en el tramo de la instalación estudiada han sido determinadas por la tabla del Anexo I. Puesto que se quiere estudiar el caso más desfavorable para la seguridad del diseño del sistema de suministro de combustible, se han elegido las mayores pérdidas locales. Ya que no hay establecida la pérdida de carga en un codo de 30° , se opta por hacer el cálculo como si se tratase de un codo de 45° .

Se utiliza el Diagrama de Moody, representado en el Anexo I, para calcular las pérdidas debidas a la fricción del combustible con las paredes interiores de las tuberías. A pesar de que el Diagrama de Moody es utilizado para agua a $15,5^{\circ}\text{C}$, se ha decidido utilizarlo para este estudio ya que proporcionará una aproximación y será un valor muy pequeño respecto a los demás términos.

Al realizarse la descarga del depósito secundario, la válvula de descarga permitirá la salida de combustible. Por lo tanto, para realizar el estudio, se establecerá que la presión a la salida de la tubería de descarga a la piscina (p_2) será igual a la presión atmosférica (p_a).

Como ya se ha indicado en puntos anteriores, las tuberías de toda la instalación tienen un diámetro interior de media pulgada (12,7cm), para minimizar los costes ya que se trata de un diámetro normalizado.

Por tanto, las variables conocidas de la ecuación de Bernoulli con pérdidas [18] relativas al caso de estudio aquí descrito son:

Dimensiones: $a=3\text{m}$; $b=0,4\text{m}$; $d_{\text{tubería}}=0,0127\text{m}$

Pérdidas de carga: $K_{\text{entrada}}=0,5$; $K_{\text{caudalímetro}}=1$; $K_{\text{codo } 30^{\circ}}=K_{\text{codo } 45^{\circ}}=0,39$; $K_{\text{válvula descarga}}=0,1$ [15]

Combustible: $T_{\text{combustible}}=355\text{K}$; $\rho_{\text{combustible}}=784,91\text{kg/m}^3$; $\mu_{\text{combustible}}=1,1166 \times 10^{-3}\text{kg/ms}$;
 $Q=0,37\text{l/seg}=1,332\text{m}^3/\text{h}$

Tubería: $e_{\text{PTFE}}=0,0008$

A partir de la ecuación 1, se realizan los siguientes cálculos:

Ya que $A_{\text{depósito}} \gg d^2$ se puede despreciar el segundo término de la ecuación.

Como se ha indicado anteriormente, el sistema de suministro estará abierto luego $p_2=p_a$.

Despejando de la ecuación 1 el término de interés se obtiene la ecuación 2 antes indicada.

Se calcula, con la ecuación 3, la velocidad con que será transportado el combustible hasta su descarga dado el caudal requerido [1].

$$v_2 = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 1,332}{\pi \cdot 0,0127^2 \cdot 3600} = 1,1316 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dónde:

- Q es el caudal de combustible descargado a la piscina.

Se calcula el número de Reynolds relativo al paso de un fluido por el interior de un conducto, con la ecuación 4.

$$\text{Re}_d = \frac{\rho v_2 d}{\mu} = \frac{784,91 \cdot 1,1316 \cdot 0,0127}{1,1166 \cdot 10^{-3}} = 6517,02$$

Dónde:

- μ es la viscosidad dinámica del Jet A1 a 335K de temperatura.

Se calcula el cociente entre la rugosidad relativa del material interior del conducto y el diámetro interior del conducto, con la ecuación 5.

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{0,002}{12,7} = 1,57 \cdot 10^{-5}$$

Con los valores obtenidos en las ecuaciones 4 y 5, se obtiene del diagrama de Moody recogido en el Anexo I que el coeficiente de fricción es:

$$f = 0,034$$

Por tanto se trata de un flujo transitorio.

Se calculan los últimos términos necesarios para resolver la ecuación 2.

$$\sum K_m = 1,99; L = 3,4m$$

Por tanto, sustituyendo todos los valores ya calculados anteriormente, se obtiene a través de la ecuación 2 el siguiente resultado de presión manométrica en el interior del depósito secundario:

$$p_{1m} = 9,81 \cdot 784,91(-1,76) + \frac{1}{2} 784,91 \cdot 0,73^2 \left\{ 1 + 0,034 \frac{3,4}{0,0127} + 1,99 \right\} = -11023Pa$$

Realizando el cambio de unidades: $p_{1m} = -11023Pa \approx -0,1bar$

Se tomará $p_{1m} = -0,1bar$ como valor de la presión manométrica que debe de haber como mínimo en el depósito secundario.

Por tanto, manteniendo la presión del depósito secundario a presión atmosférica (1bar) se cumpliría con el requerimiento que establece AIRBUS de verter el combustible en la piscina de ensayo en menos de 5 segundos, llenando el volumen establecido.

2.3.3. Conclusiones cálculo hidráulico

Tras realizar ambos estudios se puede asegurar que, incrementando la presión en 0,2bar en el depósito principal con ayuda del Nitrógeno, se podrá cumplir con el requerimiento establecido por AIRBUS respecto al caudal a suministrar a la piscina de ensayo. Además, se asegurará el llenado del depósito secundario por completo. Esto se debe a que se han contemplado los casos más restrictivos a los que se puede enfrentar el sistema de suministro de combustible.

2.4. Instrumentación

Para poder obtener toda la información necesaria a la hora de realizar un correcto control de la instalación se necesitarían los siguientes elementos.

2.4.1. Tipos de sensores

- Sensores de temperatura, tipo pt-100

Basa su funcionamiento en la variación de resistencia debido a los cambios de temperatura que experimenta el medio donde se encuentra inmerso el sensor. De tal forma que a 0°C tiene 100 ohm y al aumentar la temperatura, aumentará la resistencia. Se trata de un tipo de particular de RTD (Dispositivo Termo Resistivo). El elemento consiste en un arrollamiento

muy fino de Platino entre capas de material aislante y protegido por un material cerámico por la parte exterior, como revestimiento.

TC S.A. [19] es una empresa que posee gran variedad de sensores de este tipo. Se puede seleccionar multitud de configuraciones, eligiéndose la de Aislamiento Mineral por poder ser usada en multitud de localizaciones y rangos de temperatura.

- Sensor de temperatura, tipo K

El termopar consiste en dos conductores metálicos diferentes, unidos en un extremo, denominado junta caliente o detectora, y que van conectados a algún instrumento de medición, ya sea un mili voltímetro o potenciómetro. Los alambres de conexión van desde la cabeza conectora de la junta caliente hasta la unión de medición, que incluye al medidor y la unión de referencia. Esto muestra que los termopares son en realidad, detectores que miden la diferencia de temperatura que existe entre el extremo de la unión caliente y la unión de referencia. Los conductores deben generar una fuerza electromotriz tan grande como sea posible para un cambio unitario de temperatura y deben poseer ciertas características para lograr esto.

Al igual que en el caso del tipo pt-100, se ha escogido la empresa TC S.A. [19] como suministradora para estos sensores. Se ha seleccionado también de Aislamiento Mineral, pero no se trata de una restricción ya que no es determinante.

- Transductor de presión

Los sensores de presión o transductores de presión son elementos que transforman la magnitud física de presión o fuerza por unidad de superficie en otra magnitud eléctrica que será la que emplearemos en los equipos de automatización o adquisición estándar. Los rangos de medida son muy amplios, desde unas milésimas de bar hasta los miles de bar. Para cubrir los diferentes rangos de medida, precisión y protección, existe de una gran variedad de transductores de presión, fabricados con diferentes tecnologías, que permiten cubrir todas sus necesidades. En este caso se utilizaría sensores industriales de presión que permitan acoplarlos de forma rápida y segura a los puntos requeridos para adquirir el valor de la presión de éstos.

Se escoge como producto comercial un transductor de presión fabricado por Vega y suministrado por RS [20]. Posee el siguiente código RS: 313-5389. Se ha escogido este sensor en concreto ya que cumple con los requisitos necesarios según el sistema de suministro de combustible.

- Sensor de caudal

También puede ser denominado como caudalímetro. Se trata de un elemento intrusivo en el paso del fluido que permite medir el flujo de líquido o gas que pasa a través de una sección

de paso determinada. Existen diseños que minimizan al máximo la intrusión de este elemento en el fluido a transportar, evitando incrementar en exceso la pérdida de carga en ese punto o reteniendo el fluido en exceso y falsear la medida. Este sensor basa su funcionamiento en medir la velocidad con la que gira una hélice que se encuentra en su interior y propulsada por el paso del fluido. De este modo, habría que introducir las características propias del fluido a transportar y el caudalímetro transmitirá a través de una conexión electrónica el valor del caudal que está registrando el sensor.

Medición y transporte S.A. [20] es una empresa especializada en combustibles aeronáuticos. Por tanto, poseen sensores de caudal que cumplirían con los requisitos del sistema de suministro de combustible.

- Sensor de nivel

Existen multitud de sistemas para poder obtener el nivel de un líquido en un depósito. En este caso se ha optado por uno de los más tradicionales y fiables ya que no se requiere una exactitud extrema en la medida, sino que únicamente sirve como orientación. El tipo de sensor de nivel seleccionado es el de flotador. Este sistema sigue el mismo principio que el sensor de temperatura pt-100, ya que se trata de una resistencia variable en función del nivel del depósito donde se encuentra el sensor. Consiste en una varilla que en un extremo tiene un flotador suspendido en la superficie del combustible por flotabilidad y en el otro está en contacto con una resistencia por la que circula una corriente eléctrica controlada. En función de la posición del flotador, la diferencia de potencial en los extremos de la resistencia variará, ya que variará la intensidad que circula a través de ella, puesto que a su vez la resistencia varía en su valor. Esa diferencia de potencial eléctrico es medida por una tarjeta de adquisición de datos y permitirá conocer el nivel de cada depósito en todo momento.

Se ha optado por un sensor de nivel fabricado por Pepperl + Fuchs y suministrado por RS [20], con código RS: 350-2060. Se ha elegido este tipo ya que se ajusta a los requisitos del sistema de suministro de combustible.

- Sistema de control

Puesto que no es objetivo de este Trabajo el control electrónico del sistema de suministro de combustible, no se especificará el diseño en profundidad de esta parte del sistema. Únicamente se indicarán las necesidades del sistema y un posible suministrador.

Se necesitará un sistema de adquisición y control que incluya:

- Tarjetas de entradas analógicas

Esta tarjeta permite obtener en tiempo real los diferentes valores que proporcionan los sensores ubicados en todo el sistema de suministro de combustible. A través de una corriente eléctrica generada por la propia tarjeta y enviada a cada uno de los sensores, la

tarjeta leerá la diferencia de tensión entre los puertos del sensor o la variación de la corriente eléctrica a la salida de cada sensor, enviando posteriormente una señal al ordenador. Esta señal enviada podrá ser traducida en las unidades de la magnitud media por el sensor conectado, a través de un software compatible con la tarjeta de entradas analógicas. De este modo se puede tener un registro y un control de todas las variables que gobiernan el sistema de suministro de combustible.

- Tarjeta de salidas analógicas

Esta tarjeta sigue el mismo principio que la tarjeta anteriormente descrita. En este caso, la función a desempeñar por la tarjeta es la de accionar las válvulas de la instalación cuando el personal responsable de la instalación accione el pulso a enviar a través del software instalado en el ordenador de control. La tarjeta enviará al relé indicado un pulso eléctrico que desplazará la válvula a la posición deseada. Gracias a la instalación y utilización de esta tarjeta se podrá efectuar un control por remoto del proceso, evitando riesgos asociados a operar las válvulas in situ.

- Software de control

Para poder efectuar un correcto control y adquisición de las variables del sistema, se precisará de un ordenador conectado a las tarjetas y con el software correspondiente a éstas instalado. De este modo, una persona podrá realizar el control del sistema de suministro de combustible, teniendo una perspectiva completa del proceso. Además, se podrán conectar a éste las videocámaras o cámaras termográficas, si se requiere, posibilitando un óptimo control de los ensayos requeridos [1].

Se propone como empresa suministradora a National Instruments [21], ya que se trata de una empresa especializada en el diseño de sistemas de adquisición y control en procesos industriales, pudiendo proporcionar un diseño electrónico que se ajuste a las necesidades del sistema de suministro de combustible aquí descrito.

2.4.2. Localización y funciones de sensores

- Transductor de presión del depósito principal

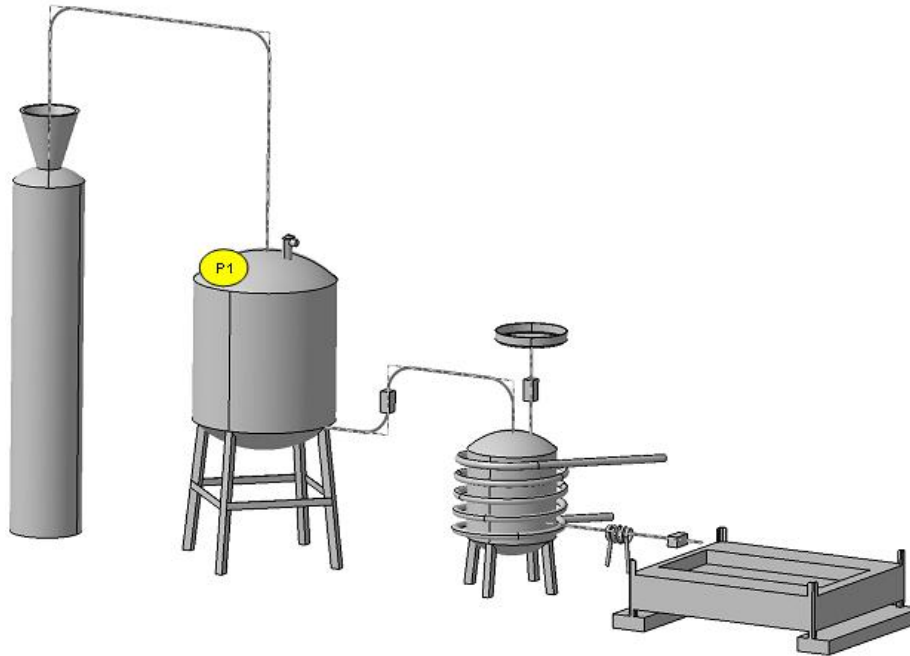


Imagen 37: Localización Transductor de presión 1

La función que ha de desempeñar este sensor es la de proporcionar al personal de control el valor de la presión que hay en el depósito principal. Se requiere mantener el control de esta presión, puesto que un aumento de ésta puede provocar un accidente. Gracias a este sensor se podrá verificar el correcto funcionamiento de la válvula de seguridad entre el depósito y la bala de nitrógeno, puesto que deberá de coincidir el valor que registre el sensor con la presión de descarga del nitrógeno. Como se ha descrito anteriormente, el transductor de presión del depósito principal irá conectado a una tarjeta de entradas analógicas para poder efectuar el control de la media.

- Sensor de nivel del depósito principal

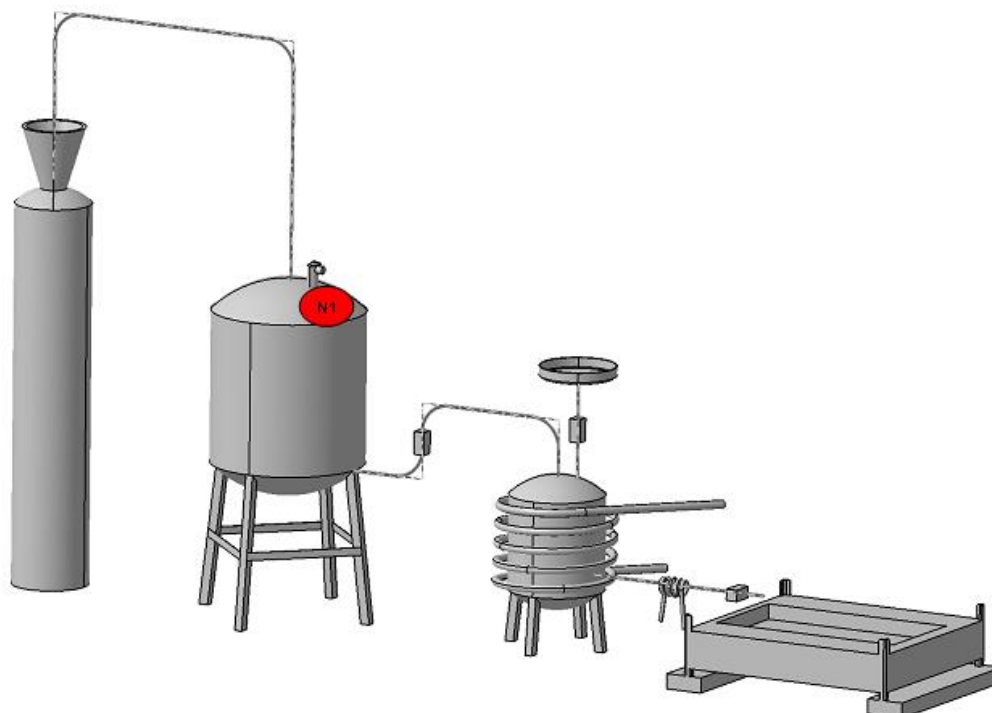


Imagen 38: Localización sensor de nivel 1

Para poder establecer el número de ensayos que se podrán realizar sin necesidad de añadir combustible a la instalación, se empleará este sensor. Además, proporciona un valor exacto de la cantidad de combustible de la que se dispone, y por consiguiente, la cantidad de nitrógeno almacenado en el depósito principal. Se trata de una forma sencilla de asegurar el correcto funcionamiento del depósito de almacenamiento, ya que al estar conectado a una tarjeta de entradas analógicas, se mostrará en el PC de control el valor de nivel registrado.

- Medidor de caudal entre depósitos

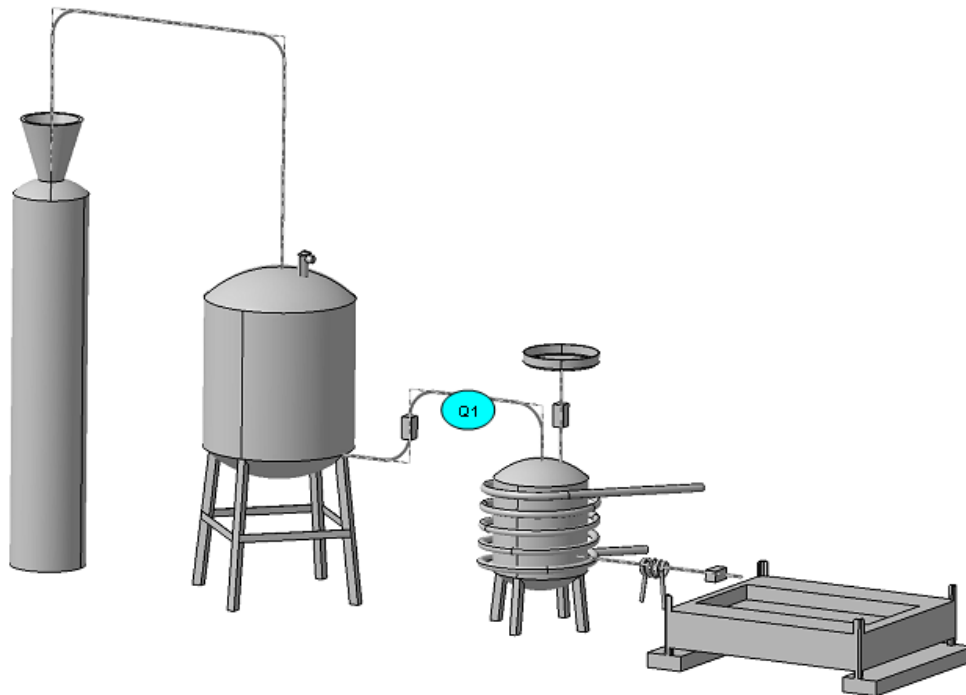


Imagen 39: Localización Medidor de caudal 1

Con el fin de asegurar el correcto funcionamiento de la instalación, se determina la inclusión de este medidor de caudal. Permitirá registrar la cantidad de combustible que es transportado de un depósito a otro, además de establecer la velocidad con la que lo hace. Este elemento de media no es estrictamente necesario, ya que al pasar el fluido del depósito de almacenamiento al de calentamiento, el sensor de nivel del de almacenamiento registrará dicho transporte, pero se ha considerado útil para las tareas de puesta en marcha.

- Transductor de presión del depósito secundario

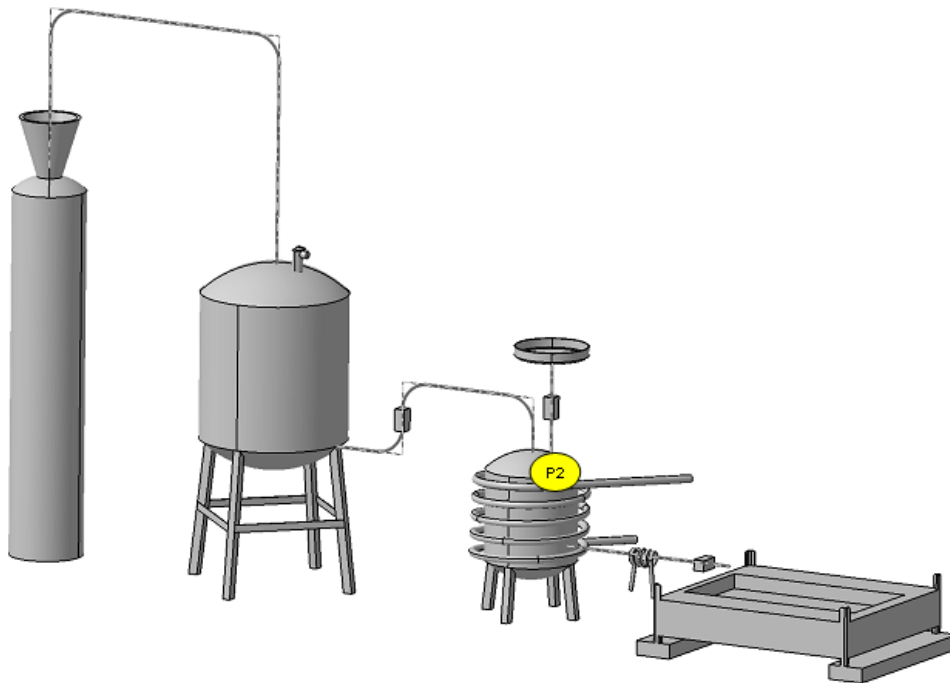


Imagen 40: Localización Transductor de presión 2

Del mismo modo que en el caso del depósito principal, se requiere un transductor de presión en el depósito de calentamiento. Es de gran importancia este sensor ya que permitirá registrar el aumento de la presión en el depósito al ser calentado el combustible. Además, este sensor será de gran utilidad en las tareas de tarado de las válvulas de seguridad de la instalación. Al tratarse de un transductor idéntico al del depósito principal, éste también irá conectado a una tarjeta de entradas analógicas que permitirá al software mostrar el valor de la presión en el depósito secundario.

- Sensores de temperatura del depósito secundario

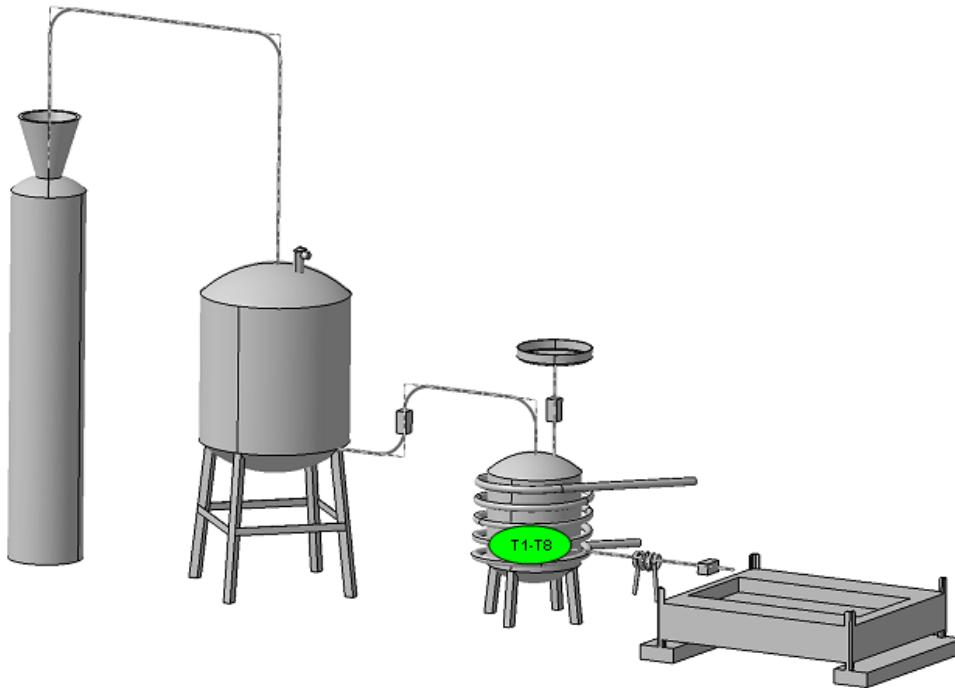


Imagen 41: Localización Sensores de temperatura T1-T8

Gracias a estos sensores de temperatura se podrá establecer el momento en el que el depósito secundario puede evacuar el combustible para ser enviado a la piscina del ensayo. Se dispondrán varios sensores para poder efectuar una lectura más fiable de la temperatura del combustible, evitando así fallos de operatividad por puntos calientes en el interior del depósito. Es necesario tener un registro en directo de la media de los sensores durante el calentamiento, ya que se trata de un proceso crítico en el que un desfase temporal puede provocar un fallo en el objetivo de la instalación. Por ello se conectarán directamente a una tarjeta de entradas analógicas que permita visualizar la temperatura de todos los sensores.

- Sensor de nivel del depósito secundario

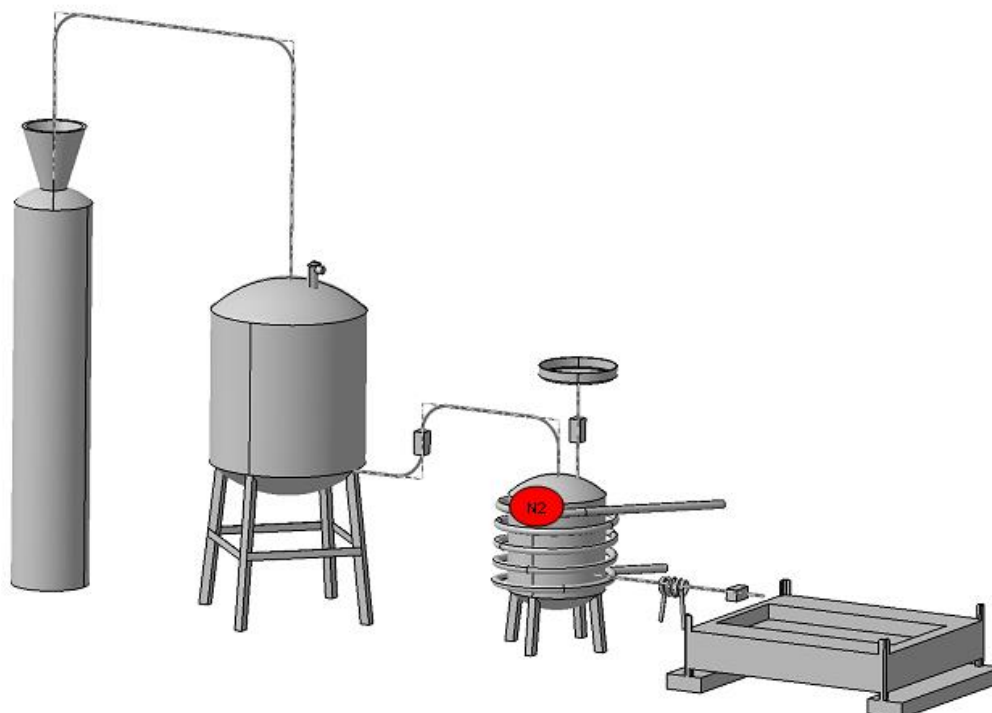


Imagen 42: Localización Sensor de nivel 2

Con este sensor se pretende establecer la medida del volumen de combustible del que se dispone para realizar un ensayo. De este modo, en caso de que se haya realizado un ensayo en el que no se haya requerido todo el volumen, se podrá establecer con cuanto combustible se puede contar para la realización de otro, ya que se podrá considerar en condiciones térmicas de ensayo. Del mismo modo que en el caso del depósito principal, el sensor de nivel debe ir conectado a una tarjeta analógica que registre la medida realizada por éste, ofreciendo al personal de la instalación la posibilidad de controlarla.

- Medidor de caudal a la salida del depósito secundario

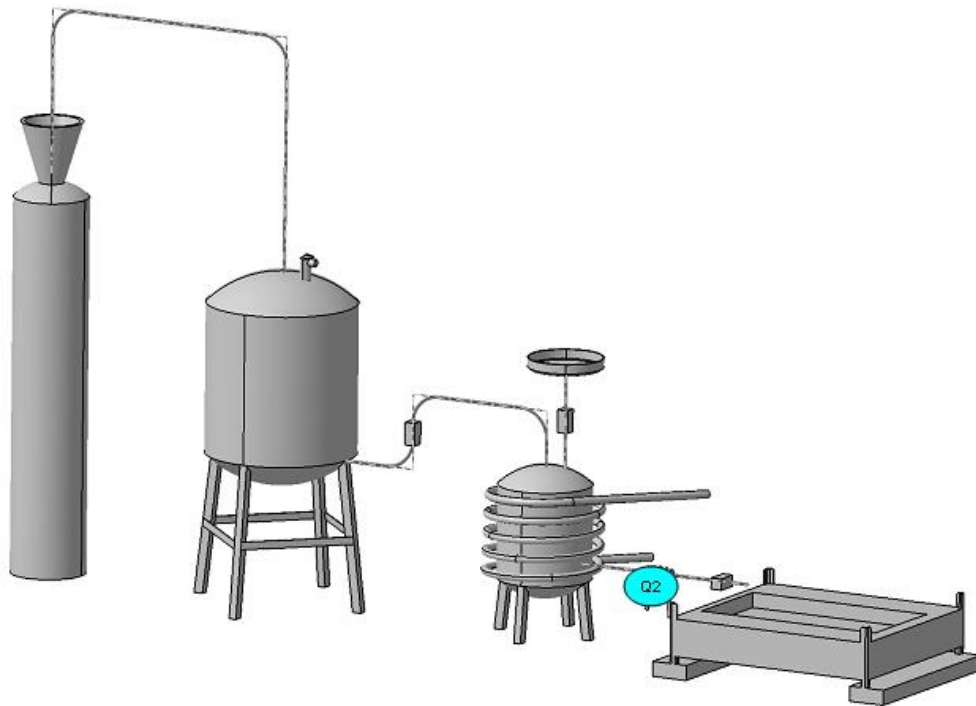


Imagen 43: Localización Medidor de caudal 2

Puesto que existe un requisito de volumen de llenado de la piscina y de tiempo efectuarlo, se requiere un medidor de caudal a la salida del depósito secundario. En el momento en que se registre que el volumen de combustible requerido en la piscina ha pasado a través del medidor, la válvula de la salida cortará el paso de fluido. Por el contrario que en el caso del anterior medidor de caudal, éste sí que es de altísima relevancia, puesto que es el encargado de asegurar que se cumple con los requerimientos del ensayo en cuanto a volumen de combustible vertido y tiempo en efectuarlo. Como se ha indicado en el anterior medidor de caudal, este también deberá ir conectado a una tarjeta de entradas analógicas que posibilite la adquisición de las variables requeridas en el ensayo.

- Sensor de temperatura ambiente

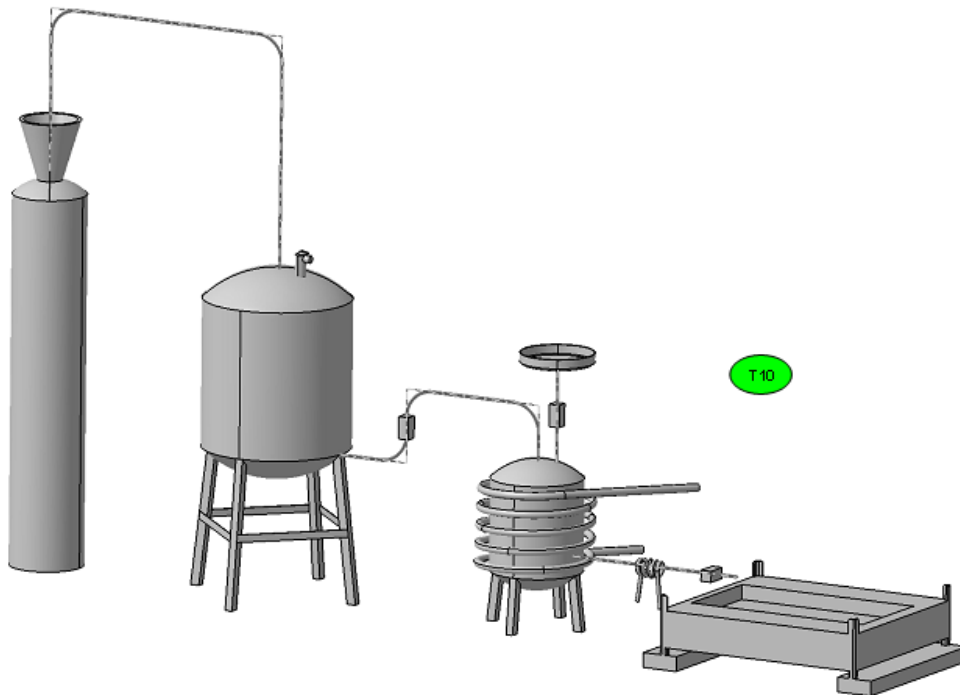


Imagen 44: Localización Sensor de temperatura T10

La función de este sensor de temperatura es meramente orientativa ya que no se requiere del dato medido para el funcionamiento de la instalación. Lo que se pretende con la inclusión de este elemento en la instalación es proporcionar al personal de control de una idea para establecer los tiempos que se necesitarán para llevar al combustible a las condiciones de ensayo requeridas. Para poder visualizar este dato en el PC de control, deberá conectarse a una tarjeta de entradas analógicas que sea controlada por el software de control.

- Sensores de temperatura en la tubería de descarga

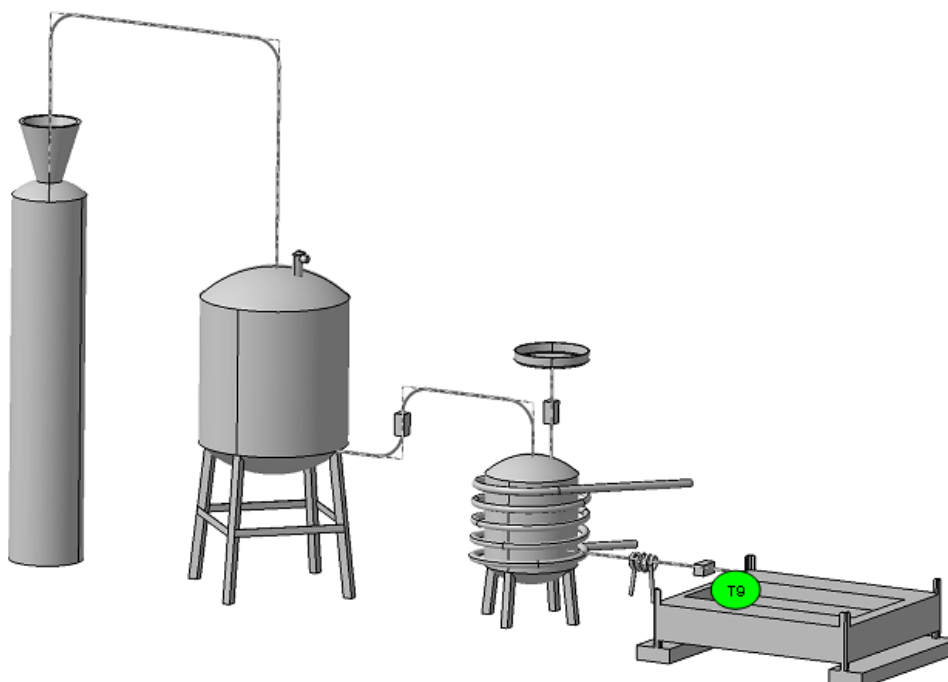


Imagen 45: Localización Sensor de temperatura T9

Además del volumen de combustible en la piscina y del tiempo de llenado de ésta, existe el requerimiento de temperatura anteriormente descrito, que establece que el combustible debe ser descargado a 68°C . Por ello, se incluye un sensor de temperatura al final de la tubería de descarga, ya que se trata de una tubería calefactable que evita las pérdidas térmicas con el exterior. Este sensor establecerá el momento en el que el combustible se encuentra en condiciones finales de ser descargado a la piscina de ensayo, proporcionando el dato numérico de la temperatura del combustible en la descarga, que será utilizado para cumplir con el requerimiento de ensayo. Del mismo modo que los sensores de temperatura utilizados en toda la instalación, éste deberá conectarse a una tarjeta de entradas analógicas para poder dotar al personal de control de la temperatura del combustible que será descargado a la piscina de ensayo.

A continuación se muestra una tabla que recoge todos los elementos de medida y una imagen con la localización de cada uno de los sensores descritos.

Ítem	Tipo	Medida	Localización	Rango necesario	Frecuencia
P1	Transductor de presión	Presión	Depósito principal	0/3 bar	5 Hz
P2	Transductor de presión	Presión	Depósito secundario	0/3 bar	5 Hz
N1	Sensor de nivel	Volumen	Depósito principal	0/120 l	5 Hz
N2	Sensor de nivel	Volumen	Depósito secundario	0/7 l	5 Hz
Q1	Medidor de caudal	Flujo de combustible	Entre ambos depósitos	0/5 m ³ /h	5 Hz
Q2	Medidor de caudal	Flujo de combustible	Tubería de descarga	0/5 m ³ /h	5 Hz
T1	Pt 100	Temperatura combustible	Depósito secundario	-10/80 °C	1 Hz
T2	Pt 100	Temperatura combustible	Depósito secundario	-10/80 °C	1 Hz
T3	Pt 100	Temperatura combustible	Depósito secundario	-10/80 °C	1 Hz
T4	Pt 100	Temperatura combustible	Depósito secundario	-10/80 °C	1 Hz
T5	Pt 100	Temperatura combustible	Depósito secundario	-10/80 °C	1 Hz
T6	Pt 100	Temperatura combustible	Depósito secundario	-10/80 °C	1 Hz
T7	Pt 100	Temperatura combustible	Depósito secundario	-10/80 °C	1 Hz
T8	Pt 100	Temperatura combustible	Depósito secundario	-10/80 °C	1 Hz
T9	Pt 100	Temperatura combustible	Tubería de descarga	-10/80 °C	1 Hz
T10	Termopar tipo K	Temperatura ambiente	Exterior	-10/50 °C	1 Hz

Tabla 2: Instrumentación

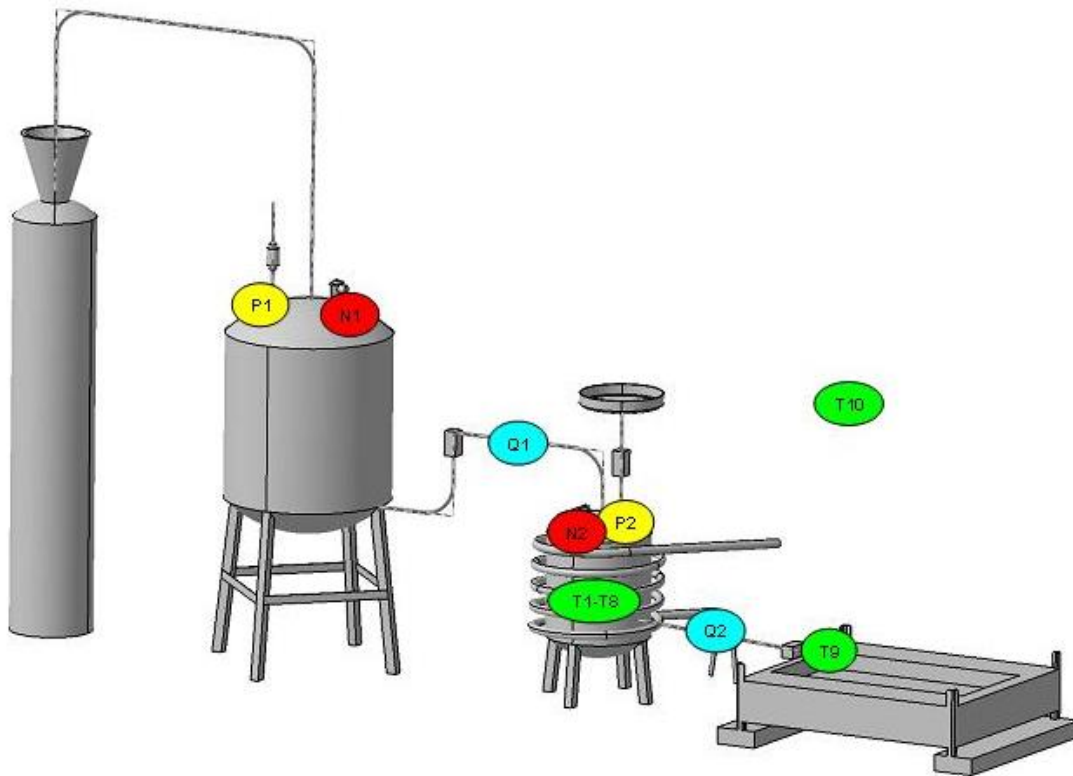


Imagen 46: Localización instrumentación

2.5. Operatividad del sistema de suministro de combustible

En este punto del Trabajo se explicará cómo realizar las operaciones que se deben llevar a cabo para un correcto funcionamiento y control del sistema de suministro de combustible para el ensayo requerido por AIRBUS [1].

Por un lado, se indicarán mediante un diagrama de bloques los pasos que deben seguir el personal de control antes de poner en funcionamiento el sistema de suministro de combustible.

Por otro lado, también a través de un diagrama de bloques, se establecerán las operaciones y verificaciones que se han de realizar para que el combustible sea suministrado según los requerimientos del ensayo y objetivos de este Trabajo.

Se ha optado por emplear este sistema de representación ya que facilitará la labor al personal de control del sistema de suministro de combustible a la hora de realizar el software de control y adquisición.

Ambos diagramas hacen referencia a la siguiente imagen en la que se localiza la instrumentación y los componentes del sistema de suministro de combustible que van a ser empleados para ambos grupos de operaciones.

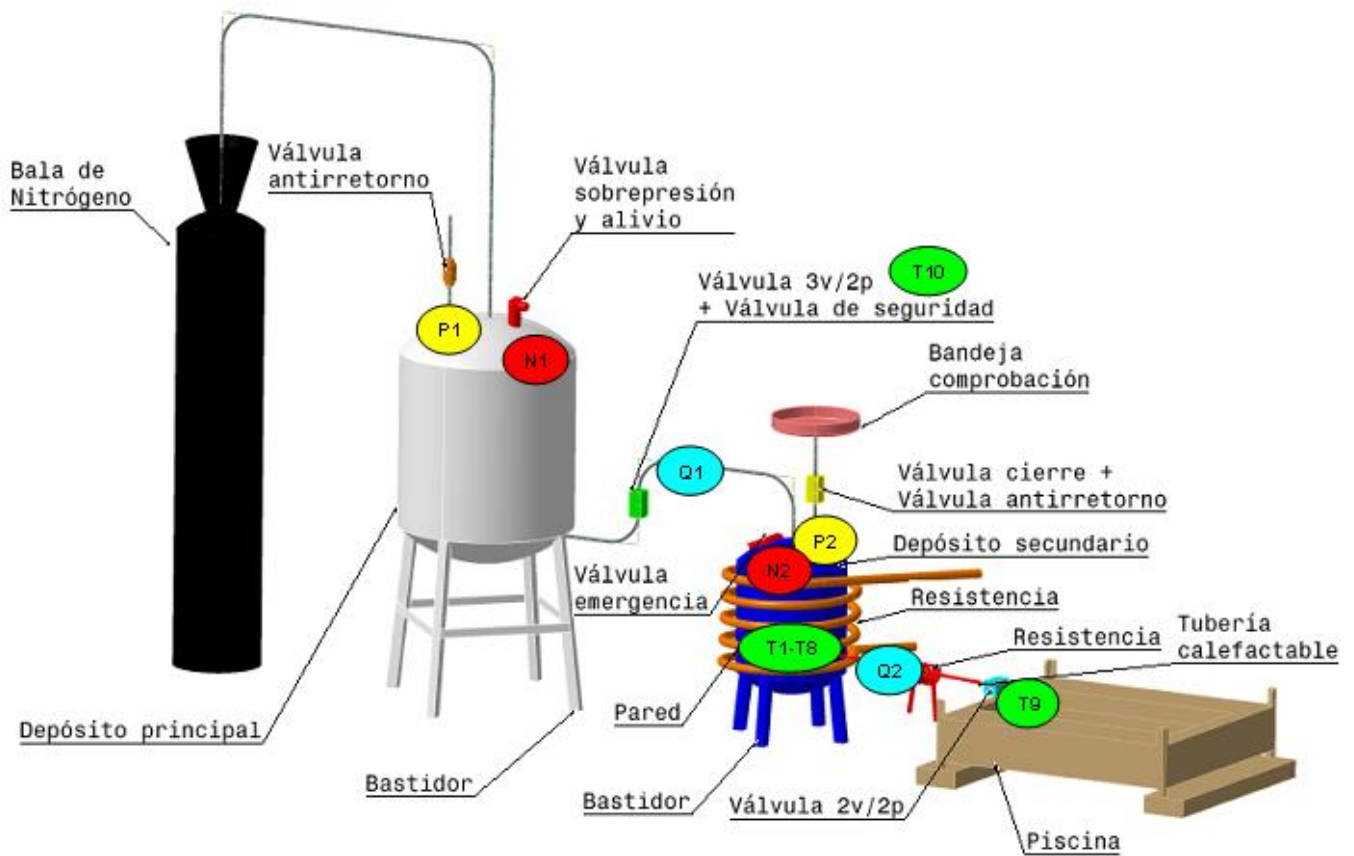


Imagen 47: Esquema componentes e instrumentación

2.5.1. Operaciones de puesta a punto

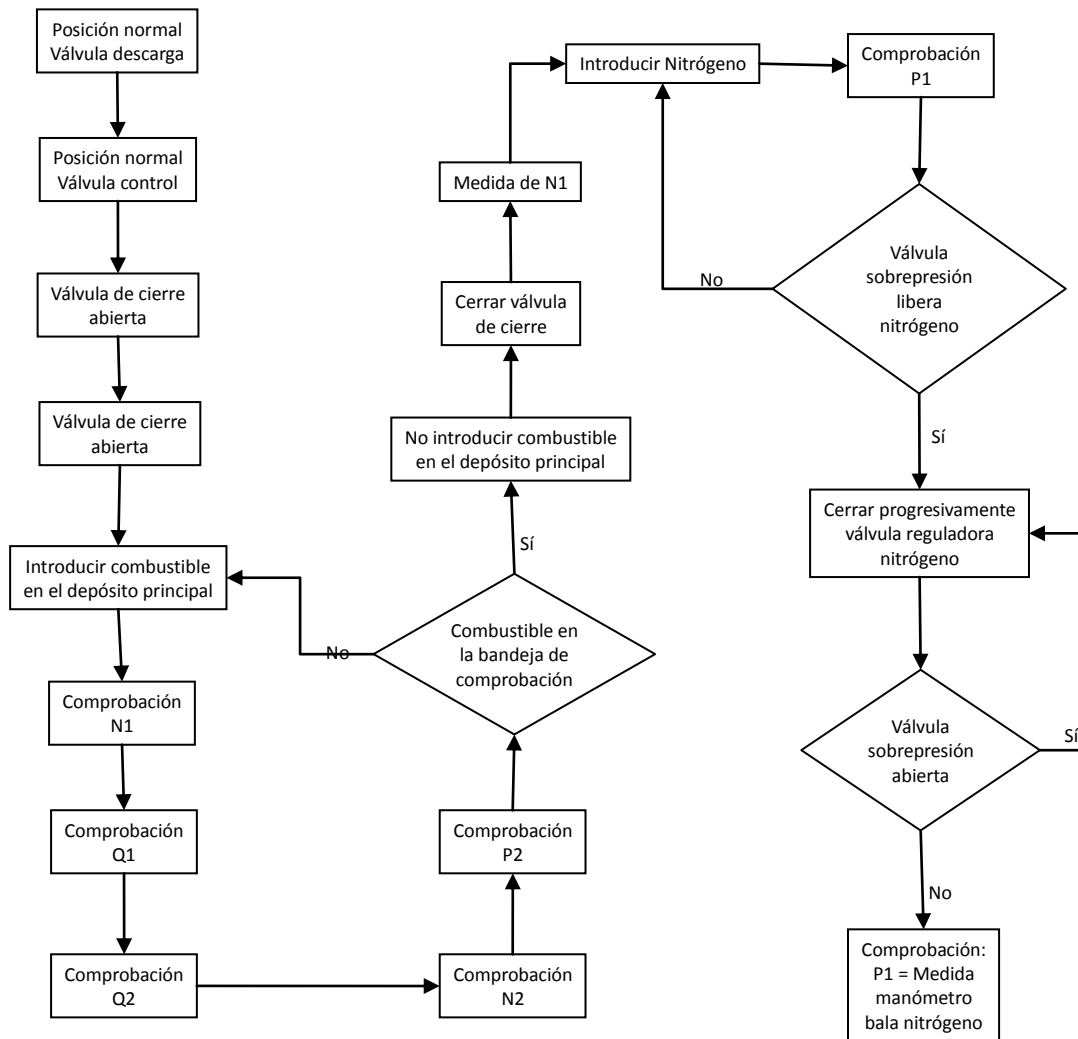


Diagrama 2: Operaciones de puesta a punto

2.5.2. Operaciones de funcionamiento

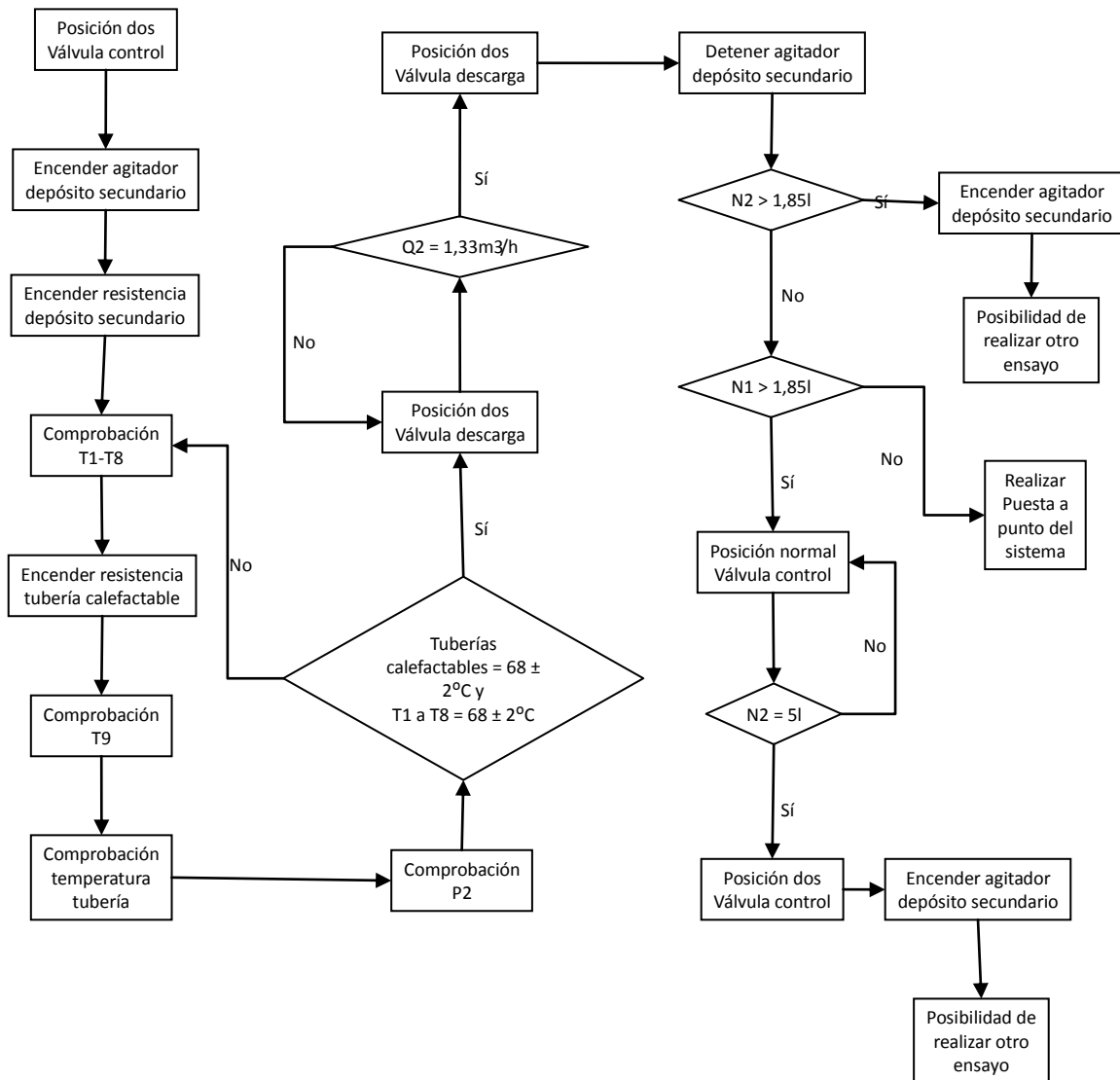


Diagrama 3: Operaciones de funcionamiento

3. Conclusiones

Según los componentes utilizados en el diseño del sistema de suministro, se asegurará que la temperatura del combustible antes de ser descargado tendrá una temperatura de 68°C [1]. Esto se verificará en la lectura del termopar tipo pt-100 número 9.

Según el diseño, se verificará que gracias al medidor de caudal Q2 que el volumen requerido de 1,852 ±0,285 litros [1] es vertido en 5 segundos o menos.

Se ha diseñado un sistema de suministro de combustible óptimo desde el punto de vista de la seguridad para el personal de control.

Se ha optado por un diseño del sistema de suministro de combustible simple que posibilite cumplir con los requerimientos establecidos por AIRBUS [1] y que sea flexible ante posibles modificaciones en su implantación.

4. Trabajos futuros

En la siguiente lista se indican futuros aspectos a desarrollar del sistema de suministro de combustible:

- Desarrollo del software para realizar el control y adquisición del sistema.
- Automatización de las operaciones de puesta a punto y funcionamiento.
- Desarrollar modificaciones para poder emplear el sistema en otras aplicaciones.

5. Referencias

- [1] BERGOTTI, David. "Fire Bench for Tests with Cold Novec₁₂₃₀". AIRBUS, 2012.
- [2] <http://www.takeoffbriefing.com>, 2013
- [3] <http://www.airliners.net>, 2013
- [4] <http://cielus.wordpress.com>, 2013
- [5] Federal Aviation Administration. *General guidelines for measuring fire-extinguishing agent concentrations in powerplant compartments*. AC 20-100. USA: FAA, 1977.
- [6] <http://es.wikipedia.org>, 2012
- [7] <http://www.prodiversitas.bioetica.org>, 2012
- [8] <http://solutions.3m.com>, 2012
- [9] GRIJALVA ACOSTA, Rubén Darío. "Implementación del filtrado ciclónico en el proceso del tratamiento de Jet Fuel en la planta del terminal El Beaterio de la empresa Petrocomercial". Director: Raúl Baldeón. Plan de Proyecto previo a la obtención del Título de Tecnólogo en Petróleos. Universidad Tecnológica Equinoccial, Escuela de Ingeniería, 2009.
- [10] <http://www.repsol.com>, 2013.
- [11] <http://www.bachiller.com>, 2013.
- [12] <http://www.spiraxsarco.com>, 2013.
- [13] <http://www.sgsbombas.com>, 2013.
- [14] <http://www.provindus.com.py>, 2013.
- [15] <http://www.buerkert.es>, 2013.
- [16] <http://www.tecno-products.com>, 2013.
- [17] <http://www.praxair.es>, 2013.
- [18] WHITE, Frank M. *Mecánica de Fluidos*. Vera Coello, Marcos (trad.); Hermanns Navarro, Miguel (trad.); Gómez Blanco, Rafael (trad.); Flores Arias, Óscar (trad.); Liñán Martínez, Amable (resp. téc.). 5a ed. Madrid: Mc Graw Hill/INTERAMERICANA DE ESPAÑA S.A.U., 2004. ISBN: 84-481-4076-1.

- [19] <http://www.tc-sa.es>, 2013.
- [20] <http://es.rs-online.com>, 2013.
- [21] <http://spain.ni.com>, 2013.
- [22] <http://www.aeih.org>, 2012
- [23] <http://www.caloryfrio.com>, 2013
- [24] <http://www.tecnun.es>, 2013
- [25] <http://www.cma.gva.es>, 2013
- [26] <http://www.insht.es>, 2012
- [27] Federal Aviation Administration. *Aircraft fire extinguishing agents*. AC 150/5210-6D. USA: FAA, 2004.
- [28] European Aviation Safety Agency. *Decision no. 2003/14/RM of the Executive Director of the Agency*. CS23-Amdt 3. Europe: EASA, 2012.
- [29] INCROPERA, Frank P.; DeWITT, David P. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Cruz, Ricardo (trad.); Muñoz Díaz, Enrique (Rev. Téc.); Delgado Núñez, Lourdes (Ases. Téc.). 4a ed. México: PRENTICE HALL, 1999. ISBN: 970-17-0170-4.
- [30] <http://www.termokew.mx>, 2013

ANEXO I

Diagrama de Moody[18]:

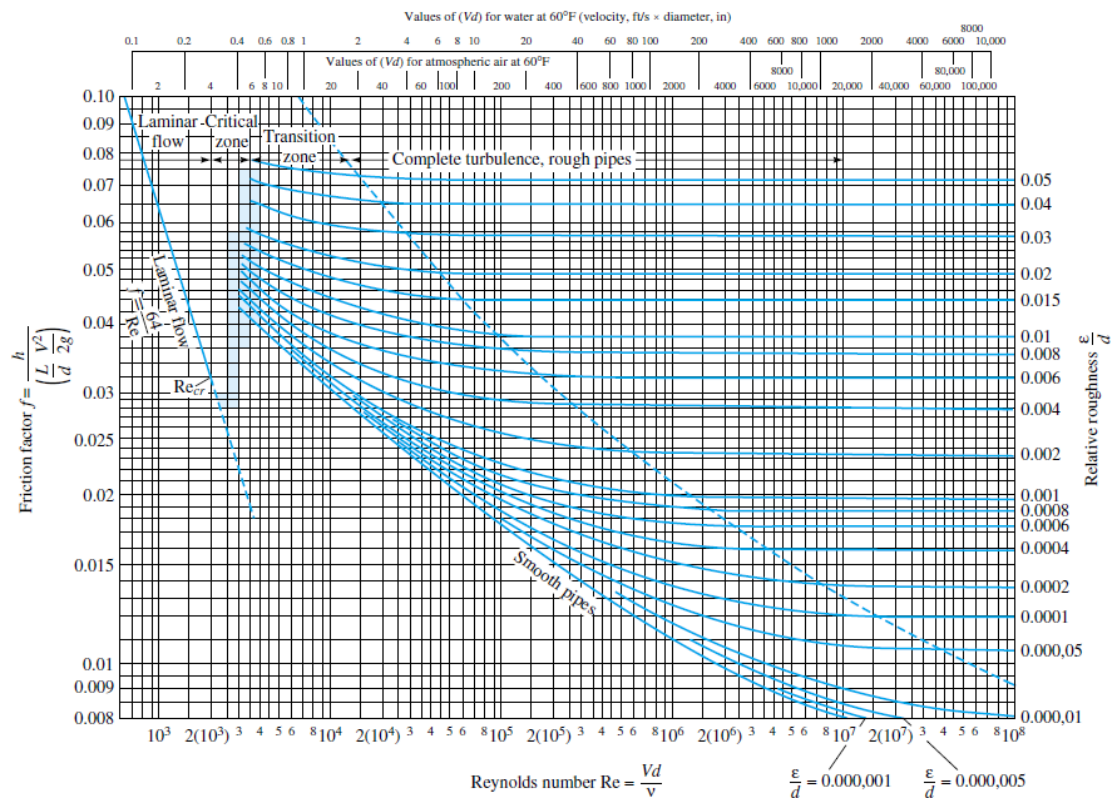


Tabla de pérdidas de carga locales en válvulas, codos y tees[18]:

	Nominal diameter, in									
	Screwed					Flanged				
	$\frac{1}{2}$	1	2	4		1	2	4	8	20
Valves (fully open):										
Globe	14	8.2	6.9	5.7		13	8.5	6.0	5.8	5.5
Gate	0.30	0.24	0.16	0.11		0.80	0.35	0.16	0.07	0.03
Swing check	5.1	2.9	2.1	2.0		2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Angle	9.0	4.7	2.0	1.0		4.5	2.4	2.0	2.0	2.0
Elbows:										
45° regular	0.39	0.32	0.30	0.29						
45° long radius						0.21	0.20	0.19	0.16	0.14
90° regular	2.0	1.5	0.95	0.64		0.50	0.39	0.30	0.26	0.21
90° long radius	1.0	0.72	0.41	0.23		0.40	0.30	0.19	0.15	0.10
180° regular	2.0	1.5	0.95	0.64		0.41	0.35	0.30	0.25	0.20
180° long radius						0.40	0.30	0.21	0.15	0.10
Tees:										
Line flow	0.90	0.90	0.90	0.90		0.24	0.19	0.14	0.10	0.07
Branch flow	2.4	1.8	1.4	1.1		1.0	0.80	0.64	0.58	0.41

Diagramas de pérdidas en entradas (a) y salidas (b) de depósitos[18]:

